

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И
СПОРТА УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

И.В. СЕМЕНЕНКО, М.Г. ЗИНЧЕНКО

ОБРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ МЕТАНОВОГО СБРАЖИВАНИЯ
ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол №1 от 23.06.2011 г.

Харьков
НТУ «ХПИ»
2012

УДК 628.35
ББК 40.57
С 30

Рецензенты:

Л.П. Перцев, д-р техн. наук, проф. ПАО «УкрНИИХиммаш» (г. Харьков)
Н.Ф. Клещев, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ» (г. Харьков)

Публикуется по решению ученого совета университета, протокол № 6 от 10.06.2011 г.

В монографії викладено сучасні уявлення про процеси метанового зброджування. Розглянуто питання конструювання і розрахунку обладнання біогазових установок, вибору конструкційних матеріалів, використання продуктів зброджування, економічної ефективності процесу.

Для студентів, аспірантів, спеціалістів в галузі екології та нетрадиційної енергетики.

Семененко И.В.

С 30 Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов : монография / И.В. Семененко, М.Г. Зинченко. – Х. : НТУ «ХПИ», 2012. – 272 с. Рос. мовою.

ISBN

В монографии изложены современные представления о процессах метанового сбраживания. Рассмотрены вопросы конструирования и расчета оборудования биогазовых установок, выбора конструкционных материалов, использования продуктов сбраживания, экономической эффективности процесса.

Для студентов, аспирантов, специалистов в области экологии и нетрадиционной энергетики.

Ил. 74. Табл. 85. Библиогр. 168 наим.

ISBN

УДК 628.35
ББК 40.57

© Зинченко М.Г., 2012
© Семененко И.В., 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Энергетическая политика Украины в целом направлена на энергосбережение и развитие технологий использования альтернативных источников энергии.

Мировой опыт показывает, что наиболее эффективными для крупномасштабного производства новых видов топлива являются методы, основанные на использовании биосистем. Среди этих методов – достаточно хорошо освоенные биологические технологии превращения биомассы в энергоноситель – биогаз – в процессе метаногенеза. При этом источниками биомассы могут служить сельскохозяйственные отходы, специально выращенные энергетические культуры, отходы древесины, бытовые отходы.

Проблеме ускоренного развития биоэнергетики в последние годы уделяется серьезное внимание государства. В соответствии с Государственной целевой экономической программой энергоэффективности объем замещения природного газа в энергетическом балансе страны за счет биологического топлива должен составлять, начиная с 2016 года, не менее 15 млрд м³, при этом за счет биогаза – около 8 млрд м³. Правительством Украины принято более 50 нормативно-правовых актов в поддержку производства биотоплив. Законодательством предусмотрено снижение налога на прибыль для предприятий, внедряющих энергосберегающие технологии. Новый Налоговый кодекс Украины предусматривает возможность беспошлинного ввоза оборудования для производства возобновляемых источников энергии.

Принятые законы послужили хорошим стимулом к производству альтернативных топлив на предприятиях, имеющих биологические отходы. В частности, резко повысился интерес к проектированию биогазовых уста-

новок. Это видно из участвовавших обращений к авторам данной работы за консультациями по вопросам выбора и расчета оборудования для производства биогаза.

В этой связи авторы сочли своевременным издание нового, расширенного и дополненного варианта монографии, которая под заглавием «Проектирование биогазовых установок» вышла ограниченным тиражом в 1996 г. и в настоящее время стала библиографической редкостью.

Материал монографии базируется на анализе мирового опыта и результатах собственных исследований авторов. В ней изложены современные представления о биологической сути процесса метанового сбраживания, дана характеристика сырьевой базы. Рассмотрено влияние различных технологических параметров на выход биогаза, приведены результаты исследований авторов в этой области. Книга имеет преимущественно практическую направленность, поэтому большое внимание в ней уделено вопросам выбора и расчета основного и вспомогательного оборудования биогазовых установок.

В монографии изложены результаты коррозионных испытаний различных конструкционных материалов в условиях анаэробного брожения, даны рекомендации по их выбору и повышению коррозионной стойкости при длительной эксплуатации оборудования.

В отдельной главе рассмотрены методы оценки эколого-экономической эффективности биогазовых установок.

Книга предназначена для специалистов, работающих в области утилизации сельскохозяйственных и промышленных органических отходов. Будет полезна студентам, аспирантам и научным сотрудникам, изучающим проблемы экологии и нетрадиционной энергетики.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость разработки новых эффективных способов производства энергетических носителей и восполнения сырьевых ресурсов стала особенно актуальной в мире в последние десятилетия из-за острого дефицита сырья и энергии в глобальном масштабе и повышения требований к экологической безопасности технологий.

Украина, находящаяся в значительной зависимости от импорта энергоносителей, не имеет другого выхода, как развивать собственные энергоэффективные и энергосберегающие технологии, используя альтернативные источники энергии.

Экологическая безопасность применения и высокая теплотворная способность биогаза в сочетании с простотой технологии его получения, а также огромное количество отходов, подлежащих переработке, – все это обусловило приоритетное развитие биогазовой промышленности относительно других отраслей биоэнергетики в большинстве стран мира. Толчком послужил ближневосточный нефтяной кризис, разразившийся в середине 70-х гг. Стало ясно, что ориентация только на импортную нефть представляет угрозу энергетической безопасности многих государств. Большинству экономически развитых стран пришлось срочно разрабатывать новую энергетическую стратегию, направленную на диверсификацию источников энергии, всемерное энергосбережение, в том числе с применением вторичных источников энергии (ВИЭ).

Развитие биоэнергетики стало одним из основных принципов энергетической политики и для ряда стран Юго-Восточного региона. Правительство Китая одним из первых вложило значительные средства в становление биогазовой промышленности, особенно в сельской местности. Уже в 1978 г. в стране функционировало свыше 7 млн установок, что в 15 раз превосходило уровень 1975 г. В начале 80-х гг. на так называемых семейных установках в Китае производилось до 110 млрд м³ биогаза, что эквивалентно 60–80 млн т. сырой нефти. В 90-е годы в Китае начали строить крупные установки для переработки отходов животноводства, винодельческих и спиртовых производств; сейчас их более 600 [1]. Строительство биогазовых установок (БГУ) в 70-е годы началось в Индии, на Филиппи-

нах, в Израиле, странах Латинской Америки. Интерес к данной технологии усилился также в странах центральной Европы; в 90-х гг. здесь функционировало около 600 установок по производству биогаза из жидких сельскохозяйственных отходов и около 20 – перерабатывающих твердый городской мусор. В настоящее время в Европе работает более 6400 БГУ разного типа. По данным 2007 г. на них было получено 5,9 млн т н.э. биогаза. Лидером является Германия, вырабатывающая 2,4 млн т н.э. биогаза на небольших фермерских установках, численность которых достигает 4000. Четвертое место среди стран ЕС (после Германии, Великобритании и Люксембурга) занимает Дания, где биогаз производится преимущественно на крупных централизованных биоэнергетических установках (БЭУ) из смеси навоза с органическими отходами других видов [2].

На Американском континенте биогазовые установки получили меньшее распространение, чем в Европе. Первый завод по переработке коммунальных стоков с получением биогаза был построен в 1954 г. в Форт-Додже, штат Айова. В начале 90-х годов в пригороде Нью-Йорка была сооружена установка по переработке городского мусора, которая производила около 100 млн м³ биогаза в год. Сейчас в США на специализированных комплексах крупного рогатого скота (КРС) и свинофермах эксплуатируется несколько сотен крупных установок производительностью 500 м³ /сут. перерабатываемого сырья. В Канаде для переработки отходов КРС строят преимущественно мелкие БГУ, поскольку крупные животноводческие комплексы здесь не получили распространения. Во многих странах Африки и Латинской Америки, имеющих огромное количество сельскохозяйственных отходов (свыше 90 % мировых отходов цитрусовых, бананов и кофе, около 70 % отходов сахарного тростника и около 40 % отходов мирового поголовья скота), действуют национальные программы, ориентированные на получение биогаза [3].

В Украине изучение научных основ метанового брожения началось в с исследований, проводимых 40-е годы XX столетия в научно-исследовательском и проектном институте агропромышленного комплекса (УкрНИИгипросельхоз). Первая установка по переработке навоза от 150 дойных коров и 20 свиноматок была сооружена в 1959 году в Запорожском филиале ВНИИ электрификации сельского хозяйства. В 70-х годах в опыт-

ных хозяйствах этого института – «Хортица», «Рассвет» – были построены экспериментальные биогазовые реакторы. Крупнейшим центром по разработке отечественных биогазовых установок был Запорожский конструкторско-технологический институт сельскохозяйственного машиностроения (КТИСМ). Собранные учеными данные легли в основу создания установки промышленного образца КОБОС-1, энергетический потенциал которой составлял более 180 тыс. м³ биогаза в год. На ее базе была разработана серия БЭУ высокой заводской готовности К-Р-9-1 «Кобос». Первая установка этой серии в 1982 г. была построена в Украине, в с. Гребенки Киевской области, остальные 10 проданы в различные республики бывшего СССР [4].

Исследовательские и опытно-конструкторские работы проводились также на Сумском НПО им. М.В. Фрунзе. В 1984 г. на подсобной свиноферме объединения была построена установка «Биогаз-301С» (руководитель разработки – И. В. Семененко), которая успешно проработала 20 лет. Аналогичная разработка предприятия – установка «Биогаз 2-401С» производительностью по сырью 20 м³/сут. – была внедрена в подсобном хозяйстве Уфимского машиностроительного завода.

Метантенки эксплуатировались также в составе оборудования канализационных очистных сооружений крупных городов (Киев, Харьков, Донецк и др.)

Положительный опыт эксплуатации биогазовых установок был использован при разработке республиканской научной программы «Биотехнология» на период 1986–1990 г., согласно которой к 1989 г. планировалось внедрить биогазовые установки на всех крупных животноводческих фермах и птицефабриках Украины. К сожалению, с распадом СССР действие всех государственных программ было прекращено, а большинство уже построенных установок прекратили свое существование.

За последние двадцать лет Украина заметно отстала от мирового уровня в области биоэнергетики. Если в странах ЕС возобновляемые источники энергии сегодня обеспечивают 9 % энергопотребления, в том числе биомасса – 6,2 %, то в Украине они составляют около 3 % в энергетическом балансе страны, а доля биомассы – не более 0,7 %. При этом экономически целесообразный потенциал биомассы по оценкам специалистов

составляет около 30 млн т у.т./год (до 14 % общего энергопотребления). За счет его использования реально заместить около 6 млрд м³ природного газа в год. Между тем, переработка отходов только аграрного сектора Украины позволит произвести такой объем биогаза, который может компенсировать потребление 2,6 млрд м³ природного газа в год. По данным «НТЦ Биомасса» потенциальная емкость биогазового рынка в Украине составляет примерно 3000 установок; при этом только навозных отходов животноводства достаточно для обеспечения сырьем около 4000 БГУ. Однако в настоящее время примеры внедрения биогазовых установок единичны. В сельскохозяйственных предприятиях Украины действуют три крупные установки. Все они сооружены по проектам иностранных фирм в рамках технической помощи Нидерландов, США и Дании Украине. Еще около десяти находятся в стадии строительства или проектирования. Несколько проектов внедрены на полигонах твердых бытовых отходов в Ялте, Мариуполе, Львове. По свидетельству специалистов ни одна из установок не достигала рентабельности без государственной поддержки. [5]

В то же время за прошедшие годы научно-исследовательские организации и предприятия Украины не утратили накопленного ранее опыта в проектировании и производстве энергетического оборудования, использующего биомассу. Целый ряд НИИ и университетов, в частности, институт технической теплофизики НАН Украины, институт электродинамики НАН Украины, Украинский институт исследования окружающей среды продолжают проводить исследования области метанового сбраживания. Опыт проектирования биогазовых установок обладают НТЦ «Биомасса», институт механизации животноводства (ИМЖ) УААН, компании «УкрНИИагропроект», НПП «Агробитехнология», «Стелком», «Альтек» и другие. В ИМЖ УААН разработаны малые бетонные реакторы азиатского типа объемом 4–8–12 м³. Биогазовый реактор объемом 4 м³ действует в Днепропетровской области. ЗАО «Объединенная инжиниринговая компания» (г. Днепропетровск) разрабатывает и изготавливает БГУ с объемом метантенков 3 м³ и 6 м³. По проекту НПП «Агробитехнология» в Харьковской области в селе Н.-Можарово начато строительство установки «Биогаз 5-61С» для переработки 50 т/сут. отходов КРС от окрестных фермерских хозяйств. Украинским научным центром технической экологии

(УкрНТЭК) разработаны проекты установок БИОГАЗ-6МГСЗ, БИОГАЗ-15МГС1, БИОГАЗ-50МГС1 для фермерских хозяйств Донецкой и Сумской областей. Установка БИОГАЗ-6МГСЗ в 2003 г. была построена и введена в действие на ферме КРС в окрестностях г. Лимассол (Кипр).

Анализируя современное состояние биогазового сектора энергетики в Украине можно сделать вывод о том, что его развитие происходит крайне медленно, преимущественно за счет энтузиазма отдельных научно-производственных коллективов. Экспертами определены основные причины, сдерживающие развитие альтернативной энергетики в стране [6]. К ним относится, прежде всего, отсутствие четкой государственной политики в этой области и действенной (не декларативной) государственной программы. Серьезным препятствием является отсутствие в Украине экономических стимулов использования ВИЭ, принятых в большинстве стран мира, таких как установление рыночной стоимости традиционных энергоресурсов (природного газа, нефтепродуктов, угля), использование «зеленых тарифов» на электроэнергию, вырабатываемую из биогаза. Дальнейшего совершенствования требует также законодательная сфера. Принятые в Украине законы предусматривают реальные стимулы для развития биоэнергетики, однако содержат ряд недоработок (нечеткие трактовки терминов, НДС на биомассу как на товар, лицензирование производства биогаза и др.), которые существенно ограничивают их эффективность.

Одним из серьезных барьеров на пути развития биоэнергетики в Украине является недостаточная информированность потенциальных потребителей альтернативного топлива относительно биоэнергетических технологий. В последние годы наметилась тенденция к преодолению этого барьера со стороны украинских средств массовой информации. Публикации на тему использования ВИЭ регулярно появляются в специализированных журналах, таких как «Зелена энергетика», «Экотехнологии и ресурсосбережение» и др. Важную просветительскую роль играют созданные в последние годы информационно-аналитические интернет-ресурсы, в частности, «Украинская энергетика», «Биоресурс», а также международная конференция «Энергия из биомассы (организаторы – институт технической теплофизики НАН Украины и научно-технический центр «Биомасса»)), в которой ежегодно принимают участие более 200 специалистов из Украины,

стран СНГ и дальнего зарубежья.

Успешному становлению биоэнергетики препятствует также нехватка квалифицированных кадров, поэтому одним из важнейших условий ее развития в Украине является подготовка специалистов (бакалавров, магистров, кандидатов и докторов наук) для этого сектора энергетики.

Авторы надеются, что издание данной книги внесет определенный вклад в решение некоторых из обозначенных проблем.

Глава 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАНОВОГО БРОЖЕНИЯ

В процессе анаэробной ферментации сложные органические вещества разлагаются до метана и диоксида углерода. Основными биологическими агентами, разрушающими субстрат, являются бактерии. Эффективность протекания процесса зависит от условий жизнедеятельности бактерий, которые определяются рядом факторов, таких как температура, pH среды, продолжительность сбраживания, наличие ингибиторов и др. Большое влияние на процесс оказывает состав и свойства сырья. Стабильность сбраживания определяется оптимальным сочетанием всех влияющих на процесс параметров. Изучению влияния этих параметров на эффективность брожения посвящены многочисленные исследования специалистов.

1.1. Биохимия и микробиология процесса

Метановое брожение – давно известный процесс разложения сложных органических веществ микроорганизмами в анаэробных условиях. Он широко распространен в природе (разложение органики в болотах, почве, рубце животных). Процессы деструкции органических веществ до метана происходят также в осадочных отложениях, в результате чего образуются промышленные месторождения природного газа [1].

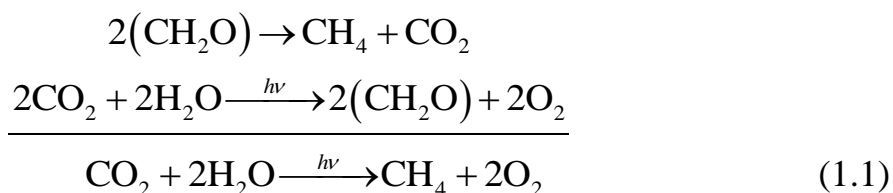
Конечным продуктом метанового брожения является биогаз, состоящий в среднем из 65–70 % метана и 25–30 % диоксида углерода с небольшими примесями сероводорода, водорода, азота.

Теплотворная способность биогаза находится в пределах 20,0–34 МДж/м³ в зависимости от содержания CO₂. Ниже приведены сведения о теплотворной способности других видов топлива в сравнении с биогазом [2]:

Топливо, ед.	Теплотворная способность единицы видов топлива, МДж.
Биогаз, м ³	21,0
Электроэнергия, кВт/ч	3,6
Уголь, кг	33,5
Древесина, кг	19,6
Бутан, кг	45,7

Производство биогаза не является достижением современной науки. Этот процесс довольно широко использовали еще в начале прошлого века. Однако понимание метаногенеза продвинулось лишь за последние годы, когда метанобразующие организмы были получены в чистом виде. Суть процесса метанового сбраживания заключается в том, что органические вещества разлагаются последовательно действующими микроорганизмами – анаэробными бактериями. Брожение проходит в несколько стадий, в течение которых сначала бактерии-гидролитики, затем кислотогены и ацетогены превращают сложные полимеры в более простые соединения – ацетат, метанол, водород, диоксид углерода, аммиак, сероводород, являющиеся субстратами для метангенерирующих бактерий [3, 4].

Конечный этап этого сложного биологического процесса осуществляют метанообразующие бактерии или метаногены. Общим итогом распада биомассы в анаэробных условиях является образование метана и CO_2 :



Последнее уравнение является суммарным для процесса биологической конверсии солнечной энергии в метан [2].

Метаногены относятся к древнейшим бактериям – архебактериям. Их история насчитывает 3–3,5 млрд. лет. Они имеют достаточно широкое распространение и активно участвуют в деструкции органических веществ в различных экологических нишах, в том числе с экстремальными условиями существования: при высоких концентрациях солей, низких значениях pH, высоких температурах [5].

Общую схему образования метана предложил Баркер в 1956 году [6], она дает достаточно наглядное представление о двух фазах этого процесса. Первая фаза – кислое или водородное брожение, где из сложных органических веществ с участием воды образуются кислоты (уксусная, молочная, муравьиная, пропионовая и др.), спирты (этиловый, бутиловый, пропионовый и др.), газы (диоксид углерода, водород, аммиак, сероводород), аминокислоты, глицерин и др. Эти процессы осуществляют обычные сапрофитные анаэробные бактерии, которые широко распространены в природе и

живут в среде с рН 4,5–7,0. Кислое брожение характеризуется обильным образованием и выделением кислот, что сопровождается снижением рН до 5,0–4,5 и появлением гнилостного запаха.

Вторая фаза – щелочное или метановое брожение, при котором метанобразующие бактерии осуществляют дальнейшее разложение веществ, образовавшихся в первой фазе. При этом выделяется газ, состоящий из метана, диоксида углерода, водорода и азота.

Представление о двух фазах процесса достаточно удобно для осуществления технологического контроля, однако схема Баркера не имеет строгой термодинамической основы.

Более широкое распространение получила схема Маккарти [7], в основе которой лежит представление о трехстадийном процессе анаэробной деградации органического вещества с участием трех физиологических групп бактерий.

На первой стадии сложные органические вещества, представляющие собой биологические полимеры (белки, липиды, полисахариды) под действием «первичных» анаэробов подвергаются ферментативному гидролизу с образованием органических кислот (масляной, пропионовой, молочной). Одновременно под воздействием микроорганизмов происходит гидролиз моносахаридов, органических кислот и спиртов. В результате образуются водород, аммиак, спирты и некоторые другие соединения. На этой стадии действуют облигатные анаэробы: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, а также факультативные: *Escherichia coli* и *Bacillus* sp.

Вторую стадию осуществляют ацетогенные микроорганизмы – специализированная группа анаэробных бактерий, превращающих органические кислоты в уксусную кислоту, водород, диоксид углерода. Ацетогенные бактерии включают как облигатные, так и факультативные виды, такие как *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Desulfovibrio*.

Реакции проходят по следующим уравнениям:

1) гидролиз органических кислот:

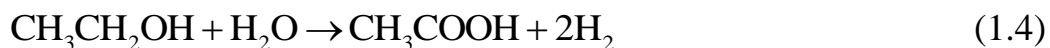
• пропионовой:



• масляной:



2) гидролиз спиртов (этанола):



На третьей стадии процесса распад органического вещества осуществляется метанобразующими и сульфатредуцирующими микроорганизмами, которые используют метаболиты, образующиеся на первых стадиях. В экосистемах с низким содержанием сульфатов образуются в основном метан, диоксид углерода и незначительное количество сероводорода.

Таким образом, метаногены используют водород для восстановления CO_2 до CH_4 :



и расщепляют уксусную кислоту до CO_2 и CH_4



Общая схема преобразования органических веществ в метан микробным сообществом представлена на рис. 1.1. Ключевой реакцией, определяющей скорость всего процесса, является реакция превращения ацетата в метан. Весь этот сложный комплекс превращений осуществляет большое количество микроорганизмов, по некоторым оценкам – до нескольких сотен видов [8, 9], среди которых преобладают бактерии.

В метаногенном сообществе между группами микроорганизмов существуют сложные симбиотические связи, когда продукты жизнедеятельности одних являются субстратами для других. Благодаря этому метановый биоценоз является очень пластичным микробным сообществом, способным функционировать как саморегулирующаяся система, поддерживающая значение pH и других факторов среды. Все это, несмотря на многостадийность биометаногенеза, обеспечивает стабильность работы метаногенных микробных систем [10].

Количественный и качественный состав этих систем зависит от состава и свойств сбраживаемого органического вещества и условий, которые создаются в окружающей среде. Важнейшими факторами внешней среды, оказывающими влияние на жизнедеятельность микробного сообщества, являются температура брожения, кислотность среды, наличие питательных и токсических веществ.

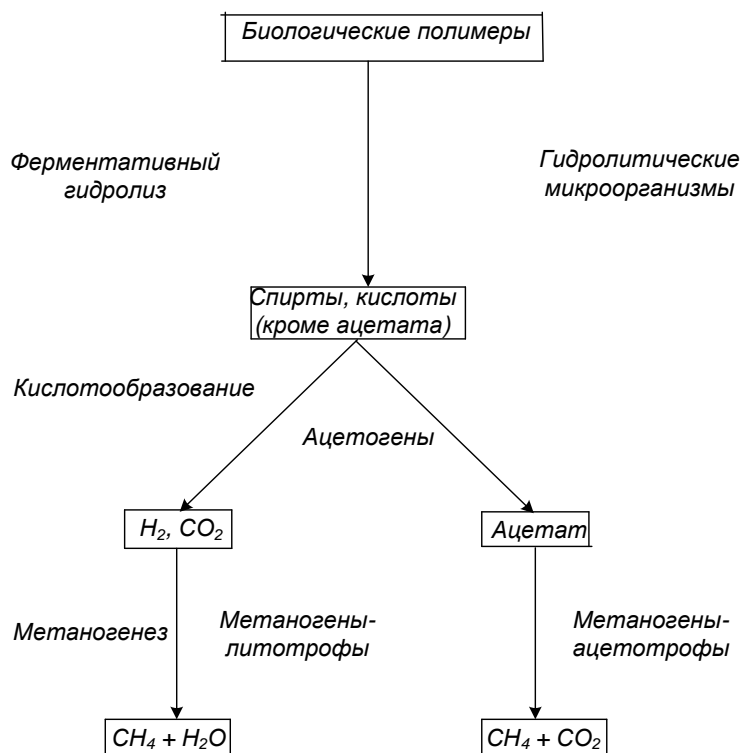


Рисунок 1.1 – Схема анаэробного распада органического вещества

Большое значение для стабильного функционирования бактерий имеют параметры технологического режима, такие как загрузка рабочего пространства биореактора, интенсивность перемешивания в нем массы, продолжительность цикла брожения.

1.2. Исходное сырье и его свойства

Среди задач, связанных с промышленным производством биогаза, важная – это выбор сырья и подготовка его к сбраживанию.

Тип сырья определяет технологию и режим процесса брожения. Главное требование к сырью – массовость, доступность, невысокая стоимость, быстрая трансформация в метан. Этим требованиям в полной мере отвечает биомасса. Как сырье для производства биогаза ее можно условно разделить на две группы. К первой группе относится биомасса, являющаяся прямым продуктом фотосинтеза, ко второй – углеродсодержащие отходы и растительные остатки. [10, 11].

1.2.1. Биомасса как непосредственный продукт фотосинтеза

В Украине основной энергетической сельскохозяйственной культурой для производства биогаза является кукуруза, выращиваемая на силос. Площадь посевов под этой культурой составляет сегодня 842 тыс. га, а потенциал производства биогаза из нее составляет 1610 млн м³ / год. По данным статистики, площадь свободных пахотных земель в Украине составляет около 5 млн га. При засеве половины свободных площадей силосной кукурузой возможно получить максимальный потенциал производства биогаза – 240,1 ПДж (5 млрд м³ / год) [12]. Для производства различных видов альтернативного топлива, в том числе биогаза, могут использоваться различные сорта и гибриды сахарной свеклы. Из 1 т корнеплодов можно получить в среднем 500 м³ биогаза.

Совершенствование технологии метанового сбраживания, появление новых направлений биологической конверсии биомассы, таких как твердофазная метангенерация, требуют изыскания новых крупномасштабных источников сырья. Одним из таких источников является специально выращиваемая растительная биомасса (деревья, кустарники, многолетние травы). В мировой практике для этих целей предусматривается создание так называемых энергетических плантаций с плотной посадкой быстрорастущих лиственных деревьев: тополь, береза, ольха и др. Скорость воспроизведения древесины этих пород достигает 210 ц/га в год, что существенно выше, чем у лесной древесины (около 30 ц/га в год). Для древесных культур подходят и неудобные (например, переувлажненные) земли. В природно-климатических условиях Украины экономически целесообразно выращивать тополь, вербу, ольху, акацию, мискантус. При высаживании этих растений на половине свободных пахотных земель технически достижимый энергетический потенциал культур составит 10,28 млн т у.т. [13].

Этот путь использования биомассы, несмотря на кажущуюся привлекательность и техническую простоту, может породить конфликтную ситуацию в землепользовании, связанную с тем, что отвод обрабатываемых плодородных земель под выращивание биомассы на топливо приводит к уменьшению площади для выращивания продовольственных культур. Для Украины выходом из ситуации может быть выращивание энергетических культур на землях, подвергшихся радиационному загрязнению и непри-

годных для использования в сельскохозяйственном производстве.

Энергетические культуры пока можно рассматривать как перспективное сырье, поскольку в Украине практически нет энергетических плантаций, за исключением нескольких экспериментальных участков. Основным препятствием на пути создания такой нетрадиционной для Украины отрасли земледелия является недостаток научно-практических исследований в этом направлении. Однако опыт европейских стран показывает, что при благоприятной ситуации этот сектор энергетики может развиваться высокими темпами [14].

Для нашей страны, имеющей выход к теплым морям и обладающей значительным зеркалом внутренних водоемов, перспективным можно считать выращивание макро- и микроводорослей и водных растений. При урожае водорослей 20 г/м^2 в сутки за летний период вегетации (120 дней) с одного гектара водной поверхности можно получить до 24 т биомассы, переработка которой в биогаз сможет дать до 12 тыс. м^3 газа, что эквивалентно 10–12 т у.т [2, 11]. Для осуществления таких проектов необходимо решить комплекс технических и технологических задач по культивированию и сбору биомассы.

Микроводоросли обладают высокой продуктивностью: за сутки они увеличивают свою биомассу в 3–5 раз, что в несколько раз превышает продуктивность тропических деревьев. При анаэробной переработке микроводорослей, например, вида *Spirulina maxima* при температуре 35–55 °C можно получить биогаз с содержанием метана в среднем 65 %. Высокое содержание метана объясняется большой концентрацией липидов. Содержание липидов можно регулировать, меняя условия выращивания водорослей. Например, у водоросли *Chlorella* содержание липидов колеблется от 20 до 77 %, протеинов – от 46 до 48 %, углеводов – от 33 до 15 %. При продуктивности биомассы 55 т/(га·год) (на сухую массу) и содержании липидов в культуре 25 и 50 % можно получить 26,3 и 32 м^3 /га·год метана соответственно [2, 11].

Водоросли и водные растения можно культивировать на сточных водах; при этом они разлагают органические вещества стоков и синтезируют значительное количество биомассы.

В настоящее время в Украине проводятся лабораторные исследования в направлении культивирования водорослей, создано несколько демонстрационных объектов, однако данная технология широкого распространения пока не получила.

1.2.2. Биомасса органических остатков и отходов

Разнообразие видового состава бактерий, входящих в метаногенный консорциум, позволяет использовать практически все виды жидких и твердых органических отходов. К этому виду биомассы относятся:

- биологические отходы животных (навоз крупного рогатого скота, помет домашней птицы и т.д.);
- остатки от сбора урожая сельскохозяйственных культур и побочные продукты их переработки: солома ржи, пшеницы, кочерыжки кукурузного початка, рисовая шелуха и т.д.;
- отходы лесозаготовок, лесопиления и деревообработки, кора, опилки, стружки, щепки;
- промышленные сточные воды (текстильных, молочных и других пищевых предприятий);
- городские отходы (ТБО и сточные воды).

Отходы животноводства

Известно, что навоз содержит значительное количество энергии, поскольку содержащийся в биомассе растительных кормов запас солнечной энергии используется животными малоэффективно. Например, в организме коровы лишь 16,4 % энергии кормов трансформируется в органическое вещество тела животного; 25,6 % – тратится на переваривание и усвоение пищи; остальные 58 % переходят в навоз [15].

В Украине по данным 2008 года сельхозпредприятия имели следующее поголовье животных: 2500 тыс. голов крупного рогатого скота, 3500 тыс. голов свиней, 75000 тыс. голов птицы [16]. Соответственно технически достижимый потенциал производства биогаза из отходов КРС составляет 49,3 ПДж, свиней – 8,6 ПДж, птицы – 10,1 ПДж.

Эффективность производства биогаза существенно зависит от состава и свойств навоза.

Жидкий навоз представляет собой смесь твердых и жидких экскрементов

тов, технологической воды, подстилочного материала, остатков корма, растворенных минеральных и газообразных веществ. Помимо этого, он содержит медикаментозные и другие вещества, применяемые для профилактики заболеваний животных и дезинфекции производственных помещений.

Навоз является опасным источником инфекционных и особенно инвазионных болезней. В нем содержится огромное количество различных микроорганизмов и бактерий, в том числе патогенных, а также яйца и личинки гельминтов. Количество бактерий в 1 г навоза достигает 20–165 млрд. Все они долгое время сохраняют жизнеспособность в навозе, затем в почве, и могут служить источником заражения животных и человека. Выживаемость бруцелл в навозе при 25 °С составляет 20–25 сут., микобактерий туберкулеза – 475 сут., вируса ящура летом – 42 дня, зимой – 190 дней. Навозные стоки свиней, кроме патогенных бактерий, могут содержать жизнеспособные яйца и личинки гельминтов. Содержание их в 1 л колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен. Хранение в навозохранилище в течение длительного периода (более полугода) не обеспечивает дегельментизации навоза [17].

В местах сосредоточения животных и птицы выделяется смесь различных газов, наиболее токсичными из которых являются аммиак и сероводород. Наиболее высокие их концентрации ($0,26 \text{ мг/м}^3 \text{ NH}_3$, $0,024 \text{ мг/м}^3 \text{ H}_2 \text{ S}$) обнаруживаются в зоне от 1 до 5 км от свиноводческой фермы [18]. При традиционных технологиях хранения и использования навоза имеет место выделение парниковых газов: метана, диоксида углерода, оксидов азота и серы.

Состав и свойства навоза могут существенно меняться при хранении. В процессе длительного хранения он подвергается воздействию микрофлоры; при этом происходит разложение органического вещества с образованием кислот. Высокое содержание летучих жирных кислот свидетельствует о том, что исходное сырье не свежее. При его загрузке в действующий реактор происходит снижение pH среды, изменяется соотношение микроорганизмов, нарушается нормальный ход процесса. В этой связи важным моментом является сбор и подготовка навоза к сбраживанию. Для обеспечения правильного сбора навоза, при котором в нем максимально сохраняется органическое вещество, животноводческое помещение долж-

но быть оборудовано специальным образом: пол в помещении должен быть щелевым, а под полом должны быть установлены специальные поддоны. Из поддонов самотеком или с помощью специальных скребков навоз направляется в сборники, где он гомогенизируется и разбавляется, а затем подается в биогазовую установку. Любая другая система сбора приводит к потере органического вещества, а значит, к потере энергии в процессе производства биогаза: на каждую тонну свежего навоза теряется количество теплоты, эквивалентное 36–39 кг у. т [19].

Сухое органическое вещество навозных стоков (СОВ) состоит, в основном, из биополимеров – белков, жиров, углеводов. От соотношения концентраций этих соединений в отходах зависит выход биогаза в каждом конкретном случае. Удельный выход биогаза (в расчете на 1 кг распавшегося СОВ) при распаде жиров в 1,5 раза выше, чем при распаде углеводов и белков. Содержание метана в газах брожения обусловлено разложением жиров и белков, а диоксида углерода – разложением углеводов. Данные о выделении биогаза из основных групп органических веществ представлены в табл. 1.1 [20].

Таблица 1.1 – Выход биогаза с 1 кг распавшегося СОВ

Компонент СОВ	Выход биогаза м ³ /кг расп. вещества	Состав газа, %		Степень распада вещества, %
		CH ₄	CO ₂	
Углеводы	0,79	50	50	64
Жиры	1,25	68	32	70
Белки	0,704	71	29	47

Используя данные об удельном выходе биогаза и количестве сброженного абсолютно сухого беззольного вещества, можно рассчитать теоретический выход газа в метантенке. Максимально возможную степень сбраживания сухого органического вещества, загружаемого в метантенк сырья (a , %), определяют по формуле [21]:

$$a = (0,92ж + 0,62у + 0,34б) \cdot 100 \%, \quad (1.7)$$

где ж, у, б – содержание жиров, углеводов и белков, г на 1г СОВ.

Выход биогаза заметно меняется, если исходный субстрат, кроме навоза, содержит растительные остатки (ботву картофеля, солому злаковых и

т.п.). В состав этих остатков входит 15–20 % лигнина, который практически не разлагается микробами и, следовательно, не принимает участия в процессе газообразования. По этой причине выход газа из экскрементов жвачных животных, которые потребляют корма с высоким содержанием клетчатки, значительно меньше, чем из экскрементов кур и свиней. По данным [22], соотношение количества газа, которое может быть получено из органического вещества навоза дойных коров (Д), откормочных бычков (Б), свиней (С) и кур (К), примерно равно:

$$Д : Б : С : К = 5 : 7 : 8 : 10.$$

Для сбраживания растительных материалов с высоким содержанием соединений углерода необходимо добавление к ним богатых азотом веществ, например, куриного помета или свиного навоза, чтобы соотношение углерода и азота (С : N) в субстрате соответствовало оптимальному для данного процесса. Обеспечение этого соотношения очень важно, так как углерод и азот являются биогенными элементами, определяющими рост и метаболизм микроорганизмов метанового биоценоза. Если соотношение С : N слишком велико, то процесс сбраживания замедляется из-за недостатка азотного питания для микробов. Если же это соотношение чрезмерно мало, то избыток азота приводит к образованию большого количества аммиака, токсичного для бактерий. По данным различных авторов, оптимальное соотношение С : N находится в пределах (11–16) : 1 [5, 9, 22, 23]. При смешении различных отходов (так называемый коферментационный процесс) соотношение С : N в сбраживаемом субстрате приближается к оптимальному, и выход биогаза значительно увеличивается (табл. 1.2) [9].

Таблица 1.2 – Увеличение продукции биогаза при смешивании различных отходов

Отходы	Производство биогаза, м ³ /кг загруж.
Навоз КРС	0,380
Свиной навоз	0,569
Помет птиц	0,617
Сорняки	0,277
Навоз КРС + сорняки (1 : 1)	0,363
Свиной навоз + куриный помет + навоз КРС (1 : 0,5 : 0,5)	0,585
Куриный помет + сорняки	0,495

Метод коферментационного сбраживания смеси органических отходов животных и растительной биомассы в последние годы широко используется в Европе. В частности, в Австрии при сбраживании смеси навоза от 50 голов КРС и растительной биомассы (измельченной травы, ботвы свеклы, кукурузного силоса) с 20 га посевных площадей получают среднегодовой выход метана около $300 \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{т СОВ}$ [23].

Этот метод может с успехом использоваться в Украине. По расчетам специалистов, используя растительную биомассу только с 10 % площадей пашни и пастбищ страны и только половину органических отходов сельскохозяйственных животных, можно получить в год до 21421,59 МВт электроэнергии, что отвечает мощности нескольких атомных электростанций [24].

Кроме углеродно-азотного баланса, для осуществления устойчивого брожения необходимо присутствие в сырье микроэлементов (железо, молибден, никель, кобальт и др.). Напротив, наличие в сбраживаемой массе антибиотиков, которые могут попадать в навоз во время лечения животных, отрицательно влияет на процесс брожения [9, 22].

Большое значение для эффективного сбраживания жидкого навоза имеют влажность сырья и содержание в нем твердых частиц. Это связано, в первую очередь, с условиями эксплуатации установки, поскольку твердые частицы, имеющие большую плотность, чем сбраживаемый субстрат (песок, глина и т.п.) образуют в метантенке осадок, а легкие частицы флоатируют и образуют на поверхности жидкости корку, препятствующую газовыделению. Кроме того, при низкой влажности ($< 86 \%$) затрудняется перемещение субстрата по коммуникациям, а при высокой влажности ($> 96 \%$) резко снижается газовыделение из-за недостаточного содержания органического вещества в сырье. Большинство специалистов считает оптимальной концентрацию сухих веществ в навозе 8–10 % [5, 9, 22, 25]. По данным наших исследований [26], оптимальная влажность свиного навоза при сбраживании в термотолерантном режиме (40–41 °С) и дозе загрузки 14 % находится в пределах 92–94 %.

Осадки городских сточных вод

Коммунальное хозяйство любой страны является непрерывно возобновляемым источником биомассы в виде твердых и жидких отходов. Про-

мышленно-бытовые стоки перерабатывают в системе биологической очистки городских сточных вод на станциях аэрации. Отходом такой переработки являются осадки сточных вод и избыточный активный ил аэротенков. Влажность этих отходов составляет 96–98 %; они содержат до 80 % органических веществ, основная часть которых (~80 %) представлена углеводами, белками и жироподобными веществами, а остальные (20 %) – относятся к лигнино-гумусовому комплексу [25].

Пригодность таких осадков к метановому сбраживанию не вызывает сомнений. Наилучшим способом утилизации образующегося биогаза является получение энергии с помощью двигатель-генератора.

Мировой опыт применения данной технологии свидетельствует о ее рентабельности и перспективности. Например, в США объем газа, который может быть получен из осадков сточных вод, оценивается в 0,6–1,12 млрд м³/год. В странах ЕС в конце XX столетия зарегистрировано 397 крупных биогазовых установок, из них в коммунальном хозяйстве – 38. В Швеции работает 8 биогазовых установок по очистке промышленных стоков, производящих 0,32 ПДж/год электроэнергии. Во Франции эксплуатируется около 50 установок, которые используются для сбраживания городских стоков и стоков пищевой промышленности [27]. На станции аэрации, перерабатывающей сточные воды г. Москвы, образуется 48 млн м³ биогаза в год; он расходуется на собственные нужды предприятия и на нужды поселка с населением численностью 9 тыс. чел. [10].

В Украине общее годовое накопление осадков сточных вод (влажностью ~ 97 %) составляет около 30 млн м³; суммарный объем биогаза, который может быть из него получен, достигает 300 млн м³/год, что эквивалентно 1,2 млн Гкал/год тепловой энергии и 520 млн кВт-ч./год электроэнергии [28]. Однако сегодня метантенки функционируют только в 7 городах Украины, а утилизация биогаза производится только на Бортнической станции г. Киева и только в качестве топлива для котельной. В настоящее время институтом УкркоммунНИИпрогресс (г. Харьков) разработана комплексная программа производства и утилизации биогаза коммунальных очистных сооружений канализации городов Украины, рассчитанная на 15 лет. Реализация программы позволит вывести из кризиса данную область коммунального хозяйства страны и эффективно использовать мощный ре-

курс производства энергии – около 300 млн м³ /год биогаза, что эквивалентно 1,2 млн Гкал/год тепловой энергии и 450 млн кВт·час/год электроэнергии [28].

Промышленные сточные воды

Метод анаэробного сбраживания широко используется для очистки высококонцентрированных производственных сточных вод, содержащих значительное количество органических загрязнений. Характеристика сточных вод некоторых предприятий и результаты их обработки в метантенках приведены в табл. 1.3 [25].

Таблица 1.3 – Результаты обработки сточных вод предприятий в метантенках

Предприятие	БПК _{ПОЛН} сточных вод (мг/л)		Степень очистки по БПК
	до очистки	после очистки	
Фабрики первичной обработки шерсти	17800	1500	92
Дрожжевые заводы	8000	2000	75
Заводы по производству спирта из мелассы	3042	391	87
Мясокомбинаты	1800	65	96

В процессе сбраживания образуется биогаз с высоким содержанием метана. Так, при переработке шерстомойных сточных вод в мезофильном режиме при времени выдержки 7 сут. выход биогаза с содержанием $\text{CH}_4 > 80 \%$ составил 0,7 м³ на 1 кг БПК_{ПОЛН}.

Сточные воды дрожжевых заводов загрязнены органическими и минеральными веществами: дрожжевыми клетками, белками, углеводами, маслами, калийными и азотистыми соединениями. БПК_{ПОЛН} этих стоков может достигать 8000 мг/л. При их сбраживании в мезофильном режиме выход биогаза на 1 кг снижения БПК составляет 0,6 м³ при содержании $\text{CH}_4 - 75 \%$; $\text{CO}_2 - 19 \%$ [25].

В Польше действует станция совместной очистки сточных вод дрожжевого завода и хозяйственно-бытовых стоков при заводского поселка [29]. Образовавшийся биогаз содержит (53–60) % CH_4 ; (25–30) % CO_2 ; (6–10) % H_2 ;

(2,4–2,8) % H_2S . В связи с достаточно высоким содержанием сероводорода биогаз перед использованием подвергают соответствующей очистке.

В России можно считать практически решенной проблему утилизации сточных вод предприятий микробиологической и пищевой промышленности. Научные основы переработки этих отходов метановым брожением с целью получения витамина B_{12} были разработаны еще в 60-х годах прошлого столетия [10]. Биогазовая станция с двумя метантенками общей емкостью 9 тыс. м^3 , работающими в термофильном режиме, производит в год до 3,5 млн м^3 биогаза. Такие установки применимы на заводах пищевой, спиртовой, сахарной, мясо-молочной, нефтеперерабатывающей и легкой (кожевенной, текстильной) промышленности. Производство биогаза этими отраслями может составить более 1 млрд м^3 в год.

В Украине имеются эффективные разработки в области утилизации отходов спиртовых заводов. В стране действуют более 80 заводов, производящих 60 млн декалитров этанола в год, как из зерна, так и из свекловичной мелассы. На этих заводах в год образуется около 4 млн м^3 отходов мелассной барды, а также около 8 млн м^3 слабозагрязненных сточных вод с ХПК 1100–1500 мг/л. В настоящее время специалистами УкрНИИСпирта и биотехнологии продовольственных продуктов разработана технология анаэробно-аэробной очистки сточных вод и жидких мелассных отходов спиртовых заводов, внедрение которой только на одном заводе средней мощности позволит получить в год около 6 млн м^3 биогаза с содержанием 70 % метана, что эквивалентно 4800 т у.т. в год. Отходы спиртовых заводов, использующих зерновое сырье, утилизируют с одновременным получением биогаза и белкового корма. Зерновую барду на центрифуге разделяют на дробину и фугат. Из дробины получают белковый корм, а фугат сбраживают с получением биогаза, выход которого составляет 15 $\text{м}^3/\text{м}^3$ фугата. На заводе мощностью 3000 дал этанола/сутки можно получить в год 1,8 млн м^3 биогаза и 6000 т корма [30].

Утилизация отходов всех спиртовых заводов Украины по разработанной технологии позволит получить в год 150–155 млн м^3 биогаза, а его использование в электрогенераторах даст 255 млн кВт-ч электрической и 375 млн кВт-ч тепловой энергии.

*Твердые городские отходы, отходы древесной
биомассы, растительные остатки*

На большинстве действующих биогазовых станций в качестве базового сырья используют навозные стоки сельскохозяйственных ферм, а в качестве дополнительного – растительные, промышленные и органические отходы. Базовое сырье позволяет повысить устойчивость процесса, дополнительное – увеличить удельный выход биогаза на единицу объема реактора. В последнее время получили распространение биогазовые станции, которые работают исключительно на растительных отходах.

Энергетический потенциал растительных остатков в Украине представлен в табл. 1.4 [31].

Таблица 1.4 – Энергетический потенциал растительных остатков в Украине

Вид растительных остатков	Энергетический потенциал растительных остатков, млн т у.т		
	Теоретический	Технический	Экономический
Солома зерновых культур	10,39	5,21	1,34
Солома рапса	1,07	0,75	0,75
Отходы производства кукурузы на зерно	5,7	3,99	2,79
Отходы производства подсолнечника	4,27	2,86	2,86

Исследованиями последних лет было установлено, что деструкция органических веществ с образованием биогаза может происходить не только в жидкой, но и в твердой фазе при влажности биомассы 30–40 % [2, 5]. Основное требование к твердофазной метангенерации – строго анаэробные условия протекания процесса. На практике это условие можно обеспечить за счет предварительного развития аэробной микрофлоры, поглощающей кислород; при этом гарантированно протекает первый этап окисления твердых сложных биологических полимеров. Процесс окисления полимеров является экзотермическим, и выделение теплоты приводит к повышению температуры на последующем этапе брожения до 30–40 °С.

При этом органическое вещество биомассы разрушается лишь частично, переходя в форму, более доступную для дальнейшего анаэробного разложения с образованием биогаза и шлама, который представляет собой почти готовое удобрение.

В ряде стран Западной Европы и США для промышленного получения биогаза по новой технологии начали использовать переработку твердого городского мусора прямо на свалках. Мусор закрывают полимерной пленкой или заливают глинистым раствором, образующим после высыхания твердую герметичную корку. В буртах сверлят несколько шурфов, которые используют для периодической подачи воздуха для первого этапа окисления, и воды – для поддержания требуемой влажности, а также для откачивания образующегося биогаза. Концентрация метана в биогазе 50–60 %. В Филадельфии одна такая установка перерабатывает за сутки 100 т твердых городских отходов. На биогазе работает газогенератор мощностью 100 кВт [32].

Технология твердофазной метангенерации успешно используется в Австралии для переработки твердых фруктовых отходов. В качестве закваски применяют активный ил; источником азота являются отходы свиноводчества или птицеводства. Количество полученной энергии в 1,6–2,7 раза превышает затрачиваемую энергию.

В Венгрии разработана промышленная установка по твердофазной метангенерации подстилочного навоза фермы на 1000 голов КРС в смеси с коммунально-бытовыми отходами. Исходный субстрат имеет влажность менее 80 %. За счет использования образующегося биогаза хозяйство экономит в год 500 т у.т. Одновременно с биогазом получают удобрение [30].

В Украине общее количество санкционированных полигонов и свалок – около 700. Примерно 140 из них пригодны для сбора и утилизации биогаза. По оценкам специалистов, суммарный объем биогаза, который может быть получен с крупных закрытых свалок страны, составляет около 400 млн м³/год, что эквивалентно 0,3 млн т у.т. С целью эффективного использования этого ресурса энергии разработан государственный нормативный документ (ДБН) «Размещение и проектирование полигонов твердых бытовых отходов», в котором регламентируется создание систем сбора и утилизации биогаза на полигонах ТБО в соответствии с современными

европейскими требованиями [28].

В настоящее время системы добычи и использования свалочного газа реализованы на полигонах ТБО городов: Львова, Луганска, Мариуполя, Ялты, Алушты. В состав этих систем, как правило, входят скважины, газосборные пункты с газопроводами, узлы подготовки биогаза, свечи для сжигания избытка биогаза. Биогаз после очистки подается в двигатель-генератор, вырабатывающий электроэнергию для собственных нужд полигона, а также сжигается в котельной, отопляющей административно-бытовые помещения [33].

Успехи в изучении фундаментальных основ твердофазной метангенерации позволили привлечь для производства биогаза дополнительный источник сырья – торф. Торф представляет собой разложившиеся растительные остатки, содержание углерода в которых достигает 50–60 %; по своей структуре он относится к твердой биомассе. Мировые запасы торфа составляют около 270 млрд т (по сухому веществу). Энергетический потенциал торфа в Украине составляет 0,77 млн т у.т. [33].

Бактериальная газификация торфа может быть осуществлена по двум технологиям: жидкофазной, когда торф подается в реактор в виде пульпы, и твердофазной. При такой переработке резко возрастает к.п.д. использования теплотворной способности торфа (при обычных способах добычи торфяные брикеты невозможно перевозить далее чем на 200 км, так как они быстро разрушаются) [2]. В США разработана технология переработки торфа, включающая 3 стадии: аэробную, анаэробную и метаногенную. Процесс стабилен, легко управляем.

Следует отметить, что научные основы твердофазной метангенерации еще не разработаны, действующие свалки практически не управляемы, процессы протекают спонтанно. Однако развитие исследований, овладение знаниями о механизме протекающих процессов окажет существенное влияние на производство биогаза из твердых органических отходов. Переработка торфа в биогаз позволит получить из разведанных в Украине запасов до 10^9 м³ газа и хорошие органоминеральные удобрения.

Огромным, и пока еще не востребуемым, резервом сырья для промышленного производства биогаза является остаточная нефть. Известно, что значительная часть нефти является продуктом физико-химической и

биологической конверсии древней биомассы. Созревание нефти сопровождалось образованием метана в результате как биологических, так и термokatалитических процессов. В Украине ежегодно добывают примерно 4 млн. т нефти, однако современные способы добычи позволяют получать лишь 40–50 % находящейся в пласте нефти, т.е. примерно 2 млн. т остаются неиспользованными. В работах С.И. Кузнецова [34] в середине прошлого века было показано, что микробиологические процессы, протекающие в нефтеносных пластах, можно использовать для бактериальной газификации остаточной нефти с целью повышения ее дебита и получения метана. Эта идея в последние 20 лет получила широкое распространение, и начаты работы с целью создания научно обоснованной биотехнологии газификации остаточной нефти [35]. Успешное решение этой сложной проблемы внесет существенный вклад в развитие биоэнергетики.

1.3. Основные факторы, влияющие на процесс метанового сбраживания

Скорость окислительно-восстановительных реакций, протекающих в процессе метанового сбраживания, определяется множеством факторов. К ним относятся: температурный режим брожения, наличие достаточного питания для микробов, значение водородного показателя, длительность процесса, интенсивность перемешивания и ряд других.

Влияние температуры

Температура оказывает существенное влияние на метаболическую активность микроорганизмов метанового сообщества и в значительной мере определяет скорость процесса брожения и производительность промышленных установок. Принято выделять три температурных области жизнедеятельности бактерий: психрофильную (5–20 °C), мезофильную (20–40 °C) и термофильную (50–60 °C). В каждой из них брожение осуществляет специфическая ассоциация микроорганизмов, обладающая наивысшей активностью при оптимальных значениях температур из данного интервала. Относительно значений оптимальных температур в литературе встречаются противоречивые сведения. Многие авторы считают оптимальной для мезофильного режима температуру 32–33 °C, для термофильного – 52–54 °C; температура в интервале 35–42 °C считается слишком

высокой для жизнедеятельности мезофильных бактерий и недостаточной для развития термофильных [10, 11, 19, 20]. Однако результаты, полученные П.В. Богдановым [36], О.П. Смирновым [37] и др. показали, что при сбраживании навозных стоков выход биогаза непрерывно увеличивается при возрастании температуры от 25 до 44 °С; при этом в качестве оптимального отмечен диапазон температур 35–40 °С. По данным В.С. Дубровского [9], полученным при 10-ти суточном сбраживании свиного навоза при температурах 25–60 °С, продукция биогаза возрастает не только в мезофильном режиме, но и продолжает расти при температурах от 40 до 50 °С, а также в области термофильных температур с оптимумом 56 °С. При этом в интервале 40–50 °С выход биогаза не ниже, чем при общепринятых мезофильных и термофильных температурах.

Для выяснения влияния температуры на процесс метанового брожения свиного навоза нами были проведены опыты на лабораторном реакторе емкостью 40 л при содержании сухого вещества 6,5 %, дозе загрузки сырья в реактор 10 %. Температуру изменяли от 25 до 65 °С. Эксперименты показали, что в мезофильной зоне наиболее активное газообразование наблюдается в области температур 37–41 °С, а максимум выхода биогаза (36 л/сут.) достигается при 39 °С. При переходе к термофильному режиму в области температур 43–46 °С выход биогаза имеет тенденцию к снижению, однако уже при температуре 47 °С начинается быстрый рост продукции биогаза, достигающий максимума (43 л/сут) при 57 °С. В области 57–65 °С наблюдался резкий спад производства биогаза до 33 л/сут. (рис. 1.2)

Полученные результаты показали, что оптимальные температуры как для мезофильного (39 °С), так и для термофильного режимов (57 °С) выше общепринятых. Это согласуется с данными [30, 31] и опровергает мнение ряда исследователей [22, 25] о том, что в мезофильном режиме действуют только мезофильные бактерии, в термофильном – только термофильные, а температуры 35–42 °С являются неблагоприятными как для одних, так и для других групп микробов.

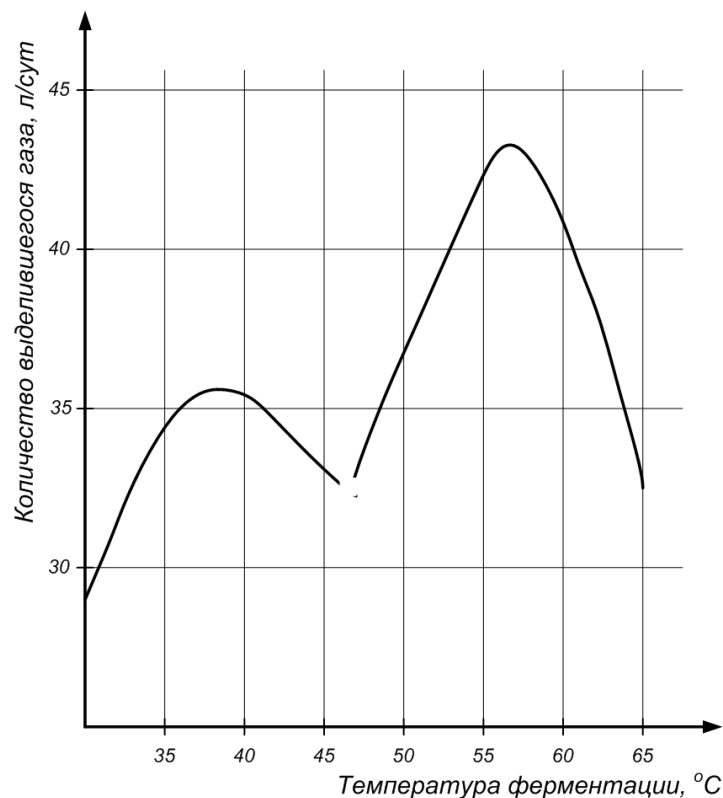


Рисунок 1.2 – Влияние температуры на выход биогаза

Очевидно, процесс газообразования во многом зависит от специфических свойств ассоциаций микроорганизмов, обитающих в метантенке, их способности адаптироваться к меняющимся температурным условиям. В то же время наши опыты показали существенное снижение выхода биогаза в интервале температур 40–50 °С. Затухание процесса брожения, видимо, связано с заменой штамма и накоплением термофильных форм. Это противоречит данным В.С. Дубровского [9], но согласуется с результатами, полученными другими авторами при обработке большого количества экспериментальных данных по сбраживанию различных отходов [10, 23].

Каждый режим сбраживания имеет свои преимущества и недостатки. Основное преимущество термофильного процесса – высокая скорость разложения сырья. С повышением температуры возрастает скорость биохимических реакций, поэтому скорость термофильного брожения в 2–3 раза выше, чем мезофильного. Это позволяет в несколько раз уменьшить расчетный объем метантенков. Кроме того, в термофильном процессе происходит более глубокий, чем в мезофильном, распад органического вещества, достигается более высокий выход биогаза при одновременном обезза-

сбраживании отходов, что дает возможность использовать сброженную массу в виде удобрений. Однако по аминокислотному составу эти биоудобрения существенно уступают полученным при мезофильном сбраживании.

В то же время поддержание термофильного процесса требует дополнительного расхода энергии, он менее стабилен, чем мезофильный, а содержание метана в биогазе ниже.

Выбор температурного режима ферментации зависит от поставленных целей, состава отходов и принятых технологических параметров процесса: дозы суточной загрузки реактора, величины рН, интенсивности перемешивания, длительности сбраживания и др. По данным наших исследований, оптимальная температура сбраживания свиного навоза при трехразовой в течение суток загрузке, дозе загрузки 14 %, содержании сухого вещества 6,7 % составляет 39 °С [36].

Влияние рН среды

Стабильность работы анаэробных реакторов существенно зависит от значения рН среды и его постоянства. Процесс метаногенеза возможен при рН от 6,0 до 8,5, однако величина оптимального значения рН, по данным разных авторов, колеблется в пределах 6,5–7,5 [22, 23], 7,0–7,2 [36], 7,5–8,0 [41]. Кислотность навозных стоков зависит от вида животных: для КРС среднее значение рН составляет 7,5–8,5, для свиней – 6,4–6,8. В своих опытах по сбраживанию свиного навоза мы подвергали исходное сырье предварительному раскислению, используя в качестве раскисляющего компонента коровий навоз в соотношении $V_k/V_c = 2/3$. Значение рН такой смеси составляло 7,0–7,2. Оптимальная величина рН сбраживаемой массы при температуре 39 °С, содержании сухого вещества в навозе 6,7 % и дозе загрузки 14 % составляет, по нашим данным, 7,8 [38].

При стабильной работе реактора рН среды самопроизвольно поддерживается на оптимальном уровне за счет взаимной сбалансированности процессов образования летучих жирных кислот и их дальнейшего превращения в метан. Снижение рН (т.н. «закисание») связано с нарушением равновесия скоростей этих процессов и может быть вызвано увеличением поступления в реактор легкосбраживаемых углеводов, а также нарушением соотношения углерода и азота в субстрате. Длительная работа реактора при рН < 6 (рН = 5) приводит к долговременному нарушению рабо-

тоспособности системы [29]. В этом случае прекращают загрузку реактора до тех пор, пока избыток ЛЖК не конвертируется в метан, а pH не достигнет оптимальных значений. Другими мерами могут быть снижение объема загрузки и добавление щелочи, в первую очередь, бикарбоната натрия [39, 40]. Такие соединения, как кальцинированная сода, известь могут образовывать нерастворимый карбонат кальция, который будет откладываться на поверхности биореактора.

Возрастание величины pH среды до значений выше 8 также тормозит процесс ферментации. Это может быть связано либо с высокой концентрацией азотсодержащих органических соединений в субстрате и образованием в нем в процессе брожения большого количества аммония, либо с присутствием в среде значительных концентраций щелочно-земельных металлов [22, 29].

Влияние дозы загрузки

При непрерывном или полунепрерывном режиме сбраживания наибольшая интенсивность процесса разложения органического вещества достигается при условии, что количество этого вещества, добавляемое в единицу времени к находящемуся в реакторе субстрату, соответствует уже разложившемуся к данному моменту количеству органического вещества. Количество свежего сырья, загружаемого в определенный интервал времени (обычно в сутки), называется *дозой загрузки*. Величину дозы загрузки (Д, %) можно выражать как отношение объема загружаемого сырья ($O_{з.с}$) к объему сырья в биореакторе ($O_{с.б}$):

$$\ddot{A} = \frac{\hat{I}_{с.б}}{\hat{I}_{н.а}} \cdot 100 \% . \quad (1.8)$$

Такое определение дозы загрузки не дает полного представления о сырье. Более точным является определение дозы загрузки ($D_{сов}$) по содержанию сухого органического вещества в сырье, а именно как отношение количества загруженного сухого органического вещества ($M_{сов}$, кг) к объему сырья в биореакторе ($O_{с.б}$ м³):

$$\ddot{A}_{н.а} = \frac{\hat{I}_{н.а}}{\hat{I}_{н.а}} \cdot \frac{\hat{M}_{сов}}{\hat{O}_{с.б}} . \quad (1.9)$$

Дозы загрузки по объему и сухому органическому веществу взаимосвязаны. Пересчет одной величины в другую требует знания влажности

В (%) и зольности З (%) поступающей на сбраживание массы и может производиться по формуле

$$D_{\text{сов}} = \frac{\ddot{A} (100 - \hat{A}) (100 - Q)}{1000}. \quad (1.10)$$

Величина дозы загрузки является технологическим расчетным параметром метантенка.

При выборе максимальной дозы загрузки по объему следует иметь в виду, что суточная убыль метановых бактерий при выгрузке осадка из метантенка не должна превышать суточного прироста микрофлоры. Каждая микробная культура имеет свою максимальную скорость роста. Количество бактерий в одном миллилитре среды обусловлено скоростью разбавления культуры, т.е. дозой загрузки. Если скорость разбавления культуры превышает скорость роста бактерий, то равновесие между ними наступить не может, и культура будет постепенно вымываться. Эту зависимость можно выразить уравнением [42, 43]

$$\frac{dx}{dt} = \mu x - \ddot{A} x, \quad (1.11)$$

где x – количество бактерий в 1 мл. среды;

t – время сбраживания;

μ – удельная скорость роста бактерий или средний часовой прирост биомассы;

D – скорость разбавления культуры, соответствующая дозе загрузки.

При $\mu = \ddot{A}$, $\frac{dx}{dt} = 0$, т.е. нет прироста или убыли массы бактерий, ее концентрация в биореакторе постоянна; при $\mu > D$ количество бактерий возрастает, а при $\mu < D$ происходит вымывание клеток бактерий из реактора. Анаэробное брожение наиболее эффективно протекает при условии постоянного роста бактерий в перерабатываемом субстрате.

Скорость разбавления D зависит от объема среды, поступающей в реактор в единицу времени F (м³/ч) и объема сбраживаемой массы в реакторе W (м³) и определяется соотношением

$$\ddot{A} = \frac{F}{W}. \quad (1.12)$$

Доза загрузки зависит, в основном, от влажности сырья и температу-

ры сбраживания и колеблется от 7 до 11 % для мезофильного и от 14 до 22 % для термофильного процесса при влажности сырья 93–97 °С [21].

Многими исследованиями [10, 22, 36] установлено, что при прочих равных условиях, чем меньше доза загрузки, тем глубже распад беззольного вещества и тем больше газа выделяется из единицы массы этого вещества. На лабораторной установке с биореактором 40 л. нами были исследованы влияние величины дозы загрузки свиного навоза на выход биогаза при температуре $40 \pm 1,5$ °С, содержании сухого вещества 6,2 % (рис. 1.3) Дозу загрузки D изменяли от 5 до 25 %.

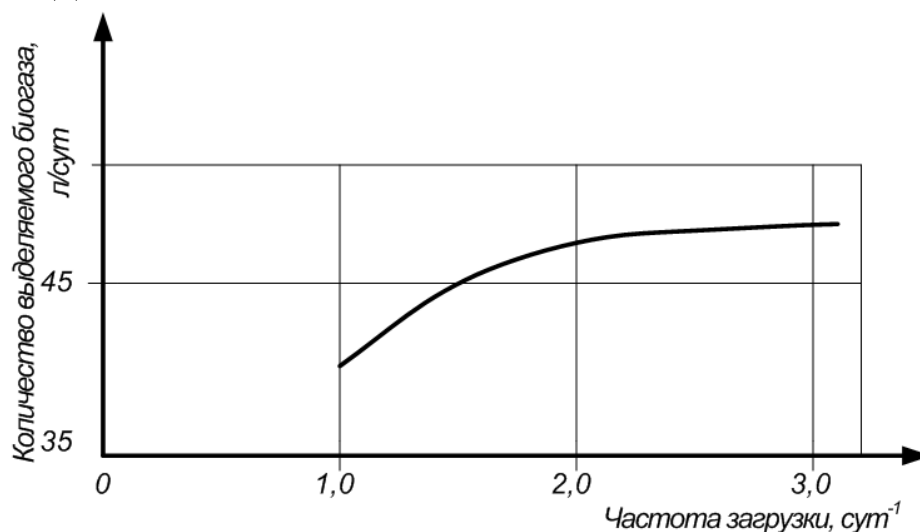


Рисунок 1.3 – Влияние дозы суточной загрузки на выход биогаза

Отмечено увеличение выхода биогаза с 16 л/сут. до 32 л/сут. при возрастании дозы загрузки от 5 до 10 % ; в области 10–17 % кривая выхода биогаза имеет вид параболы с максимумом (36 л/сут) при дозе загрузки 14 %. При дальнейшем увеличении дозы загрузки до 25 % происходит резкий спад продукции биогаза – до 16 л/сут. Одновременно отмечено снижение концентрации метана в биогазе и, соответственно, увеличение концентрации CO_2 с 26 до 34 %. Это свидетельствует о том, что для данных условий эксперимента доза загрузки более 15 % превышает оптимальную, и суточная убыль метановых бактерий при выгрузке сброженной массы больше суточного прироста микрофлоры. Величина оптимальной загрузки по нашим данным (14 %) выше, чем рекомендуемая другими авторами (8–10%) для аналогичного режима [21, 25]. Успешная работа метантенка при высокой нагрузке обеспечивалась тем, что в наших опытах сырье перед

подачей в метантенк подвергалось тщательной предварительной подготовке, во время которой завершалась кислотогенная фаза процесса, и субстрат, поступающий на сбраживание, обогащался летучими жирными кислотами – основным питанием для метаногенной микрофлоры. Это способствовало ускорению процесса метаногенеза и активизировало газообразование.

Выход биогаза зависит не только от дозы суточной загрузки, но и от метода внесения сырья в метантенк. Наши исследования показали, что при двухразовой загрузке реактора выход биогаза увеличивается в 1,2 раза по сравнению с одноразовой (рис. 1.4).

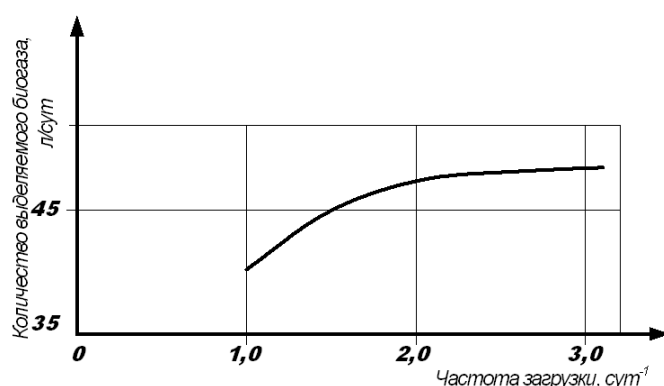


Рисунок 1.4 – Зависимость выхода биогаза от частоты загрузки

Отмечено, что при разовой суточной загрузке биогаз выделяется неравномерно, активное газовыделение происходит в первые 4–6 часов после загрузки, и часовой выход биогаза (V , л/ч) составляет 45–50 % среднесуточного (Q , л/сут), что создает значительные неудобства при использовании биогаза в качестве топлива (рис. 1.5).

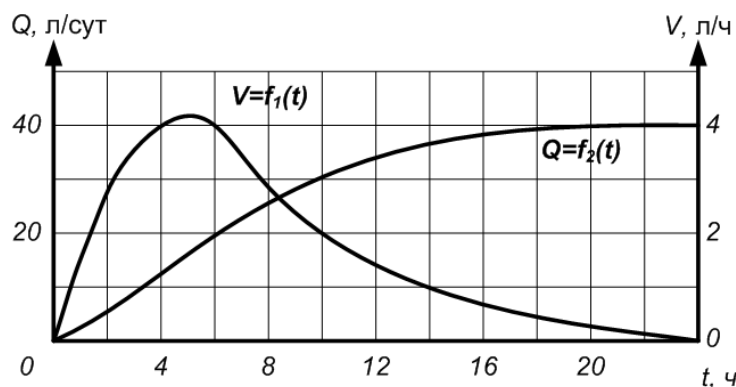


Рисунок 1.5 – Динамика газовыделения при одноразовой загрузке метантенка

Дальнейшее увеличение дробности подачи сырья в метантенк не приводит к заметному повышению продукции биогаза, однако увеличение частоты загрузки до трех позволяет достичь быстрого смешения свежего субстрата со зрелым, засеянным активной микрофлорой, сгладить нарушения температурных условий брожения, вызванных загрузкой более холодной массы и, таким образом, сделать процесс сбраживания более стабильным, а газовыделение более равномерным (рис. 1.6).

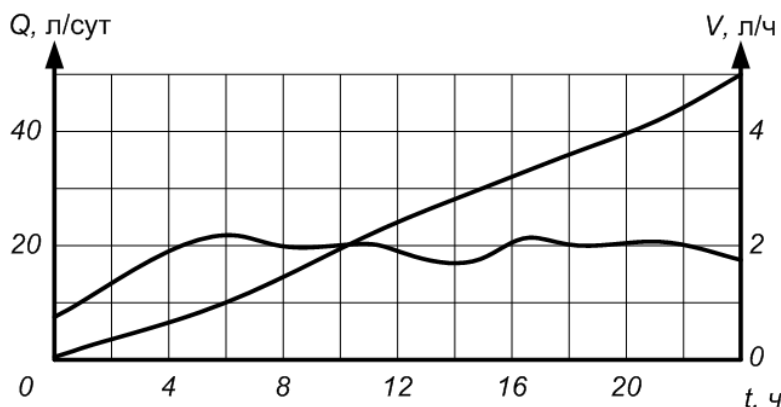


Рисунок 1.6 – Динамика газовыделения при трехразовой загрузке метантенка

Исследованиями установлено, что дробление суточной загрузки, кроме прочего, позволяет повысить эффективность использования оборудования биогазовой установки. Анализ работы промышленной установки «Биогаз 301С» показал, что деление дозы суточной загрузки лишь на две части снижает металлоемкость всей установки более чем на 6 %, а оборудования подготовки сырья – на 25 %. При этом коэффициент использования оборудования разделения отферментированной массы повышается в два раза [44].

Продолжительность брожения

С дозой загрузки неразрывно связано технологическое время брожения, т.е. время пребывания сырья в метантенке. Полное разложение органического вещества требует длительного пребывания сбраживаемой массы в реакторе и, следовательно, использования реакторов больших объемов. Время полного цикла сбраживания для различного сырья представлено в табл. 1.5 [7]. Исходя из экономических соображений, время пребывания сырья в реакторе ограничивают, сознательно уменьшая количество продукционного биогаза.

При определении продолжительности сбраживания пользуются термином *время оборота биореактора* (ВОБ). ВОБ – это время полного обновления содержимого биореактора; оно определяется отношением объема сырья в реакторе к объему ежедневно загружаемого сырья.

Оптимальное время сбраживания зависит от дозы загрузки реактора и температуры процесса сбраживания. Если время сбраживания выбрано слишком коротким, то при выгрузке сброженной биомассы бактерии из реактора вымываются быстрее, чем могут размножиться, и процесс ферментации практически останавливается. При слишком продолжительном выдерживании сырья в реакторе снижается его производительность по биогазу и удобрениям.

Таблица 1.5 – Выход биогаза в зависимости от времени сбраживания при температуре 30 °С

Сбраживаемый материал	Выход биогаза, отнесенный к массе сухого орган. вещества, мл/г	Содержание CH_4 в биогазе, %	Время полного цикла, сут.	Выход биогаза от общего количества, (%), по истечении:		
				10 сут	15 сут	20 сут
Свиной навоз	415	81	115	40	57	68
Навоз молодняка КРС	315	80	117	24	36	48

Оптимальная продолжительность сбраживания зависит также от состава и концентрации сухого органического вещества в сырье. С большей скоростью происходит образование биогаза из сырья, содержащего хорошо растворимые и легко разлагаемые бактериями органические соединения (жидкие отходы пищевой, микробиологической и других отраслей промышленности, перерабатывающих сельскохозяйственное сырье). Медленнее сбраживаются отходы животноводства, коммунальные сточные воды, содержащие твердые органические включения.

Выбор ВОБ зависит и от целей сбраживания органических отходов. Если продукт брожения предполагают использовать как удобрение, то

длительное ВОБ нецелесообразно, так как сброженная масса в дальнейшем будет подвергнута переработке почвенными бактериями. Если же органические отходы должны быть в достаточной мере обеззаражены, то необходимо обеспечить максимальную степень разложения органического вещества, а значит увеличить продолжительность сбраживания.

На практике в зависимости от температуры выбирают ВОБ в следующих пределах: при 10–25 °С – до 30 суток; при 25–45 °С – от 10 до 20 суток; при 45–60 °С – от 8 до 4 суток [22, 23, 25]. В мезофильном режиме время, за которое выделяется наибольшая часть биогаза из некоторых видов животноводческих отходов, равно примерно:

- жидкий навоз КРС: 15–20 дней;
- жидкий свиной навоз: 9–13 дней;
- жидкий куриный помет: 10–15 дней;
- навоз, смешанный с растительными отходами: 40–80 дней.

При обработке отходов животноводческих ферм особое внимание следует обращать на содержание болезнетворной микрофлоры в сброженной массе. На установке «Биогаз-301С» [26] были проведены исследования по определению эффективности обеззараживания свиного навоза в зависимости от продолжительности сбраживания. Установлено, что при температуре 50–55 °С бактерии группы кишечной палочки погибают в течение трех суток, стафилококки – в течение 4–х суток. При работе установки в термотолерантном режиме (40–42 °С) уничтожение этих бактерий происходило в течение 7 и 9 сут. соответственно.

Перемешивание

Система перемешивания биореактора служит для обеспечения однородности условий в аппарате, эффективной массопередачи между субстратом, пузырьками газа и клетками микроорганизмов. Ее использование позволяет предотвратить образование корки на поверхности субстрата, выпадение осадка и, в конечном счете, интенсифицировать процесс сбраживания.

При организации процесса перемешивания следует учитывать, что микроорганизмы заметно реагируют на кратковременные изменения давления среды, возникающие при высоких скоростях относительного перемещения слоев субстрата, вплоть до разрыва оболочек клеток микробов. Кроме того, слишком частое и интенсивное перемешивание может приво-

доть к нарушению симбиотических взаимоотношений между группами бактерий, осуществляющих метановое сбраживание, и приводить к затуханию процесса. Поэтому для правильного выбора устройств перемешивания реактора важно знать параметры оптимального режима перемешивания – продолжительности и частоты, при которых не происходит нарушения деятельности метановых бактерий.

Имеющиеся на этот счет данные весьма разноречивы. По мнению авторов [43], скорость движения субстрата при перемешивании не должна быть выше 0,5 м/с. В работе [45] содержатся рекомендации по периодичности перемешивания – через каждые 5–6 ч. По данным Хашимото [46], непрерывное перемешивание в метантенке навоза откормочных бычков увеличивает выход биогаза на 8–11 % по сравнению с таковым при перемешивании в течение 2 ч в сутки. Однако в более поздних работах автора этот вывод не подтвердился. В.С. Дубровский с сотрудниками [9] осуществлял перемешивание в биореакторах следующими методами: 1) механическим – лопастными мешалками; 2) гидравлическим – циркуляцией жидкости с помощью насоса; 3) пневматическим – барботажем биогаза. Было установлено, что второй и третий методы мало эффективны, так как при перемешивании биогазом на поверхности субстрата образуется корка, а насос засоряется твердыми частицами навоза. При механическом перемешивании вращение лопастной мешалки приводило к разрушению корки и способствовало высвобождению произведенного биогаза. Установлено, что скорость вращения мешалки должна быть не менее 5 об/мин. Прекращение перемешивания приводило к осаждению части взвешенной массы на дно реактора, и выход биогаза снижался в 2,7 раза: от 17,8 л/кг до 6,42 л/кг.

Мы проводили исследования по влиянию интенсивности перемешивания свиного навоза на выход биогаза в метантенке объемом 40 л при температуре сбраживания 41 °С, рН навоза 7,3, содержании сухого вещества 6,2 %. Продолжительность перемешивания изменяли от 5 до 75 мин.

Как видно из графика (рис. 1.7), выход биогаза наиболее интенсивно увеличивается в первые 20 мин; дальнейшее перемешивание приводит к незначительному увеличению выхода биогаза от 26 л/сут. до 28 л/сут. Очевидно, в течение 20 мин обеспечивается практически полная гомогенизация сбраживаемой массы.

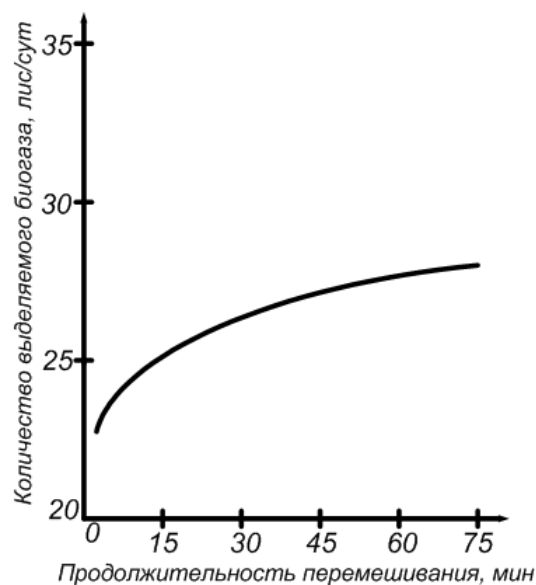


Рисунок 1.7 – Зависимость количества выделившегося газа от продолжительности перемешивания

Количество перемешиваний в опытах изменяли от 1 до 5 в сутки при длительности одного перемешивания 20 мин. Как видно из рис. 1.8, интенсивность выделения газа резко возрастает при увеличении кратности перемешивания до 3-х, затем выход биогаза стабилизируется. Следовательно, трехкратного перемешивания в течение суток достаточно, чтобы поддерживать однородность и гомогенность субстрата в период сбраживания.

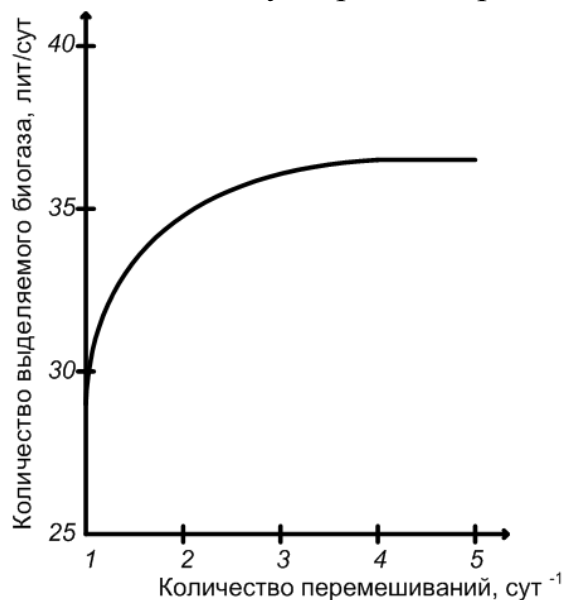


Рисунок 1.8 – Зависимость количества выделяемого газа от количества перемешиваний

Ингибиторы процесса

Ряд веществ может оказывать ингибирующее действие на процесс метанового сбраживания, причем токсическое действие на микроорганизмы оказывают только растворенные в жидкости соединения. При переходе в нерастворимое состояние их токсичное действие прекращается, так как в этом случае вещества не могут проходить сквозь стенки клеток микроорганизмов. К веществам, которые при определенной концентрации препятствуют жизнедеятельности микробов, относятся тяжелые металлы и их соли, щелочные и щелочноземельные металлы, аммиак, нитраты, сульфиды, детергенты, органические растворители, антибиотики, дезинфектанты.

Токсичность веществ зависит от адаптации к ним культуры. Если концентрация потенциально токсичных веществ в окружающей среде медленно возрастает, то многие биологические организмы могут мобилизовать свои метаболические ресурсы, блокируя тем самым проявления действия токсических веществ. Многие органические вещества в зависимости от концентрации могут оказывать на микроорганизмы стимулирующее, микробостатическое либо микробицидное действие. Например, азот аммиака в концентрациях 50–200 мг/л положительно влияет на процесс метанового брожения, в концентрациях 200–1000 мг/л не оказывает определенного действия, а при более высоких концентрациях тормозит процесс [9].

В табл. 1.6 представлены значения предельно допустимых концентраций вредных веществ – ингибиторов – в сточных водах, поступающих на очистку в метантенк [47]. При суммарном содержании соединений различных тяжелых металлов допустимые концентрации каждого ингредиента должны быть уменьшены на 30–50 % от приведенных величин. Установлен ряд усиления токсичности металлов: $\text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Ni}$.

При ухудшении процесса брожения, связанного с наличием в сбраживаемом субстрате растворенных соединений тяжелых металлов и уменьшением газообразования, предлагают в метантенк вводить некоторое количество сульфидов, при этом образуются нерастворимые соединения металлов, и корректировка процесса достигается в течение нескольких дней. В качестве источника сульфидов рекомендуется использовать сульфаты железа FeSO_4 ; при этом сульфиды будут образовываться за счет биологического восстановления сульфатов [48].

В последние годы большое внимание уделяется изучению влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на анаэробные процессы в метантенках [46]. Результаты исследований неоднозначны, но общим является то, что ПАВ оказывают влияние как на мезофильный, так и на термофильный процессы брожения. Влияние ПАВ зависит от их типа и концентрации в стоках. Отрицательное влияние ПАВ проявляется в уменьшении газовой выработки, снижении степени распада органического вещества и изменении доли участия в распаде этого вещества жиров, белков и углеводов, что вызывает изменения в составах газа и отферментированной жидкости [25].

Таблица 1.6 – Значения ПДК некоторых ингибиторов в сточных водах

Ингибиторы	Предельно допустимые концентрации в сточных водах, мг/л
Аммоний сернокислый	5
Медь	25
Никель	500
Свинец	50
Хром трехвалентный	25
Хром шестивалентный	3
Ацетон	800
Цианистые соединения	30
Бензол	200
Спирт	100
Спирт метиловый	5000
Толуол	200
Тринитротолуол	60
Детергенты (синтетические поверхностно-активные вещества) ОП-7, ОП-10	100

Исходя из необходимости обеспечения хотя бы минимального уровня распада органического вещества (35 %), установлены предельно допустимые нагрузки ПАВ [28]:

- для слаботормозящих процесс брожения – до 85 г/м^3 сут;
- для сильнотормозящих процесс до – 140 г/м^3 сут.

Для органических растворителей, антибиотиков нет точных данных о критических концентрациях, однако эти вещества даже в самых незначительных количествах приводят к ингибированию процесса метанового брожения.

Другие факторы

Для интенсификации процесса анаэробного сбраживания и активизации массообмена в современных конструкциях биореакторов применяют специальные технологические и конструктивные приемы, такие как увеличение концентрации биомассы микроорганизмов внутри реактора, рециркуляция сброженной биомассы, разделение процесса метангенерации на две фазы (кислую и метаногенную). Рассмотрим суть каждого из них.

Увеличение концентрации биомассы микроорганизмов. Концентрация микроорганизмов является важнейшим параметром, оказывающим влияние на производительность реактора. В настоящее время на практике, в основном, используются метантенки, которые относятся к реакторам первого поколения. В них все процессы проходят в одной емкости, бактериальные клетки находятся во взвешенном состоянии и по мере нарастания удаляются вместе со сброженной массой.

Как известно, необходимым условием нормального функционирования таких реакторов является равенство скоростей размножения клеток и поступления в реактор свежего сырья, причем концентрация органического вещества в сырье должна быть не ниже 1,5–2 %. При более низком его содержании необходимо увеличивать скорость протока сырья через реактор. Это повышает вынос микрофлоры из реактора, приводит к снижению плотности бактериальных клеток в объеме реактора, и процесс практически останавливается. Таким образом, лимитирующим фактором всего процесса метаногенеза является активность метангенерирующих бактерий. Увеличения этой активности можно добиться путем искусственного увеличения численности бактерий в реакторе. Это достигается при использовании реакторов второго поколения. В них необходимая плотность биомассы может создаваться за счет ее закрепления (иммобилизации) на носителях в виде биопленки. В таких реакторах можно сбраживать субстраты с низким содержанием органического вещества (0,5–1 % сухого вещества)

при высокой скорости пропускания их через реактор. В этих, так называемых анаэробных фильтрах, в качестве носителей используют керамические, полиуретановые кольца, ерши из стекловолокна, природные материалы (солома, опилки), подвергающиеся медленному разрушению [49].

Другой тип реакторов второго поколения – это реакторы, в которых используется флокулированная масса. Установлено [50], что в среде биореактора метаногены могут образовывать друг с другом и другими микроорганизмами сложные пространственные структуры – флокулы, гранулы. Размер (диаметр) этих образований составляет, как правило, несколько миллиметров. При этом, несмотря на значительную потерю мобильности, ферментативная активность бактерий практически полностью сохраняется. В таких реакторах поддерживается очень высокая концентрация биомассы (5–40 г/л), что позволяет резко снизить объемы реакторов и время пребывания сбраживаемых стоков.

Еще один способ увеличения концентрации биомассы в метантенке – выращивание культур метаногенов на специальных средах в небольших ферментерах и их периодическая подача в промышленный метантенк. Это приводит к увеличению численности метановых бактерий и увеличению общей скорости процесса [10, 51].

Рециркуляция сброженной биомассы. По этому методу сырье перед подачей в метантенк обрабатывают рециркулятом – частью сброженной массы, выгруженной из метантенка. Происходит обсеменение субстрата микрофлорой, адаптированной к условиям брожения в биореакторе. Это существенно активизирует процесс. Возврат части сброженной массы в биореактор производится после ее разделения на жидкую и твердую фракции (осадок), причем в зависимости от технологии используют ту или иную фракцию. В системе с рециркуляцией осадка сброженный шлам после метантенка выводится в отстойник, где остается густая фракция шлама, содержащая клетки микроорганизмов. Здесь же происходит ее смешение с исходным сырьем, которое подается в метантенк.

В системах с рециркуляцией жидкой фракции последняя используется как разбавитель свежего сырья до нужной влажности. Метод может использоваться при сбраживании птичьего помета, подстилочного и полужидкого навоза влажностью менее 90 %. Использование рециркулята активизирует

процесс брожения, сокращает его длительность и в несколько раз (3–4 раза) повышает производительность метантенка [10]. Ускорение процесса при рециркуляции достигается также за счет постоянного перемешивания.

Разделение процесса брожения на две фазы (кислую и метаногенную)

Для эффективного протекания процесса метанового брожения очень важно оптимальное соотношение и взаимодействие микроорганизмов разных групп метаногенного сообщества. Поэтому основной задачей при выборе оптимальной технологической схемы является обеспечение условий для формирования такого соотношения микроорганизмов и его сохранение в течение длительного периода времени. Кислотообразующие микробы имеют более высокую скорость роста, чем метанообразующие, поэтому метанообразование является лимитирующей фазой общего процесса метаногенеза. Но это справедливо лишь в том случае, когда сырье не содержит большого количества трудноразлагаемых веществ. Если таких веществ в сырье много, то общая скорость процесса лимитируется гидролизом. Проведение фаз гидролиза и метангенерации в двух разных метантенках имеет определенные преимущества, так как в каждом из них можно создать специфические, благоприятные для конкретных микроорганизмов условия. Разделение осуществляется с помощью так называемого кинетического контроля: в первом реакторе, который представляет собой традиционный метантенк, поддерживается скорость разбавления, превышающая скорость роста метановых бактерий; здесь же создается рН на уровне, оптимальном для гидролиза ($\sim 6,5$). В этих условиях в реакторе развиваются только быстрорастущие гидролитические и ферментативные бактерии, превращающие взвешенные и растворенные загрязнения в летучие жирные кислоты (ЛЖК) и спирты. В результате создаются оптимальные условия для функционирования метановых бактерий на второй стадии. После выдерживания сырье поступает в следующий биореактор для проведения второй фазы; здесь рН поддерживается на уровне 7,2–7,8. В связи с тем, что гидравлическая нагрузка во втором реакторе такая же, как и в первом, т.е. достаточно высокая, а скорость роста метановых бактерий невысока, возникает опасность их вымывания из второго реактора. Чтобы этого избежать, второй реактор конструируют в виде анаэробного фильтра [52]. Несмотря на многие преимущества двухфазного процесса, единого мнения о необходимо-

сти разделения фаз до сих пор не выработано. Считается, что такое разделение приводит к определенному увеличению общей скорости ферментации [10, 22, 25], однако, по мнению авторов [3], при использовании этого метода для сбраживания свиного навоза в термофильном режиме [54 ± 1 °C; ВОБ = 5 сут.] небольшое увеличение продукции биогаза не может покрыть расходы на второй биореактор. Г. Леттинга [53] считает нецелесообразным разделение фаз для реакторов с удержанием биомассы, так как это приводит к образованию на первой фазе избыточного активного ила, который может вытеснять медленно растущую микрофлору второй фазы. Однако, по мнению других специалистов [51], это заключение можно считать справедливым лишь для случая переработки стоков, содержащих относительно простые растворенные загрязнения (углеводы и т.п.). При очистке же сточных вод, содержащих белки, жиры, взвешенные загрязнения, способные негативно влиять на работу метановых реакторов второго поколения, применение глубокого разделения фаз анаэробного брожения технологически целесообразно.

Следует отметить, что до настоящего времени технология и аппаратное оформление кислородного брожения еще не разработаны в такой степени, как для метанового брожения. Для успешной реализации технологии двухфазного сбраживания необходимо создание специальных конструкций реакторов, обеспечивающих длительное удержание твердофазных загрязнений при высокой гидравлической нагрузке.

1.4. Оптимизация процесса метанового сбраживания органических веществ

Необходимой предпосылкой эффективной работы установок метанового сбраживания является правильный выбор параметров технологического процесса, при которых условия существования различных групп микроорганизмов в биореакторе были бы максимально благоприятными. Для решения задач оптимизации метанового сбраживания эффективно использование *методов статистического моделирования* [38, 54]. Получаемые этими методами уравнения регрессии отражают наиболее существенные связи между входными и выходными параметрами исследуемой системы. Использование аппроксимирующих моделей особенно важно на стадии прогнозирования,

когда речь идет о выявлении значимых факторов, определяющих эффективное направление развития процесса, установление адекватных взаимосвязей между ними, а также о влиянии этих факторов на процесс во всем диапазоне их значений. При построении статистических моделей наибольший интерес представляет градиентный метод Бокса-Уилсона [55], согласно которому на первом этапе определяются факторы, наиболее активно влияющие на процесс, и факторы, подлежащие исследованию.

Для определения параметров оптимального технологического режима сбраживания жидкого свиного навоза нами были проведены эксперименты на лабораторной установке (рис. 1.9), составными частями которой являлись устройства, обеспечивающие подготовку навоза к ферментации (подогреватель-сгуститель), собственно ферментацию (метантенк объемом 40 л), разделение отферментированной массы (центрифуга ЦЛС-3, сборник фугата), а также сбор биогаза и регистрацию его параметров (газосборник, газовый счетчик ГСБ-400, манометр, гидрозатвор).

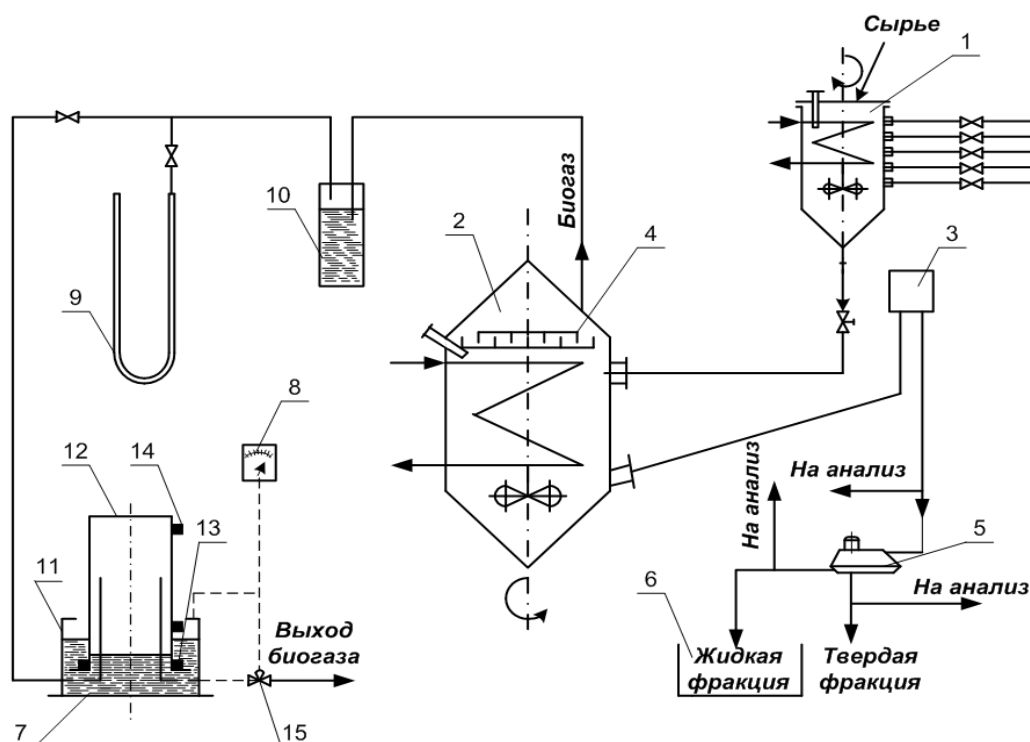


Рисунок 1.9 – Схема лабораторной установки для изучения процесса сбраживания отходов свинофермы: 1 – подогреватель-сгуститель; 2 – метантенк; 3 – переливное устройство; 4 – гребенка; 5 – центрифуга; 6 – сборник стоков; 7 – газосборник; 8 – газовый счетчик; 9 – манометр; 10 – гидрозатвор; 11 – емкость; 12 – стакан; 13 – грузы; 14 – выключатель; 15 – клапан

С целью сокращения продолжительности исследований использовали последовательный симплекс-метод (ПСМ), в основе которого лежит процедура эволюции симплекса в направлении экстремума функции цели. Большой скоростью достижения экстремума обладает градиентный метод Бокса-Уилсона, основанный на движении непосредственно по вектору-градиенту функции цели. Очевидно, наиболее экономичным по числу опытов и скорым в достижении экстремума будет метод, сочетающий процедуру построения симплекса и движения по градиенту – симплекс-градиентный метод (СГМ). Ввиду большой продолжительности каждого опыта этот метод следует считать наиболее целесообразным для оптимизации технологических условий анаэробного сбраживания.

Совокупность факторов, оказывающих существенное влияние на процесс ферментации и интервалы их варьирования, была определена на основе априорной информации и предварительных опытов [56]:

$z_1 \in \{10; 15\}$, $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{сут}$ – доза суточной загрузки – удельный объем сырья, подаваемого в реактор за сутки;

$z_2 \in \{37; 43\}$, $^{\circ}\text{C}$ – температура в реакторе;

$z_3 \in \{2; 3\}$, сут^{-1} – количество перемешиваний реакционной массы в реакторе в течение суток;

$z_4 \in \{1; 3\}$, сут^{-1} – частота подачи сырья в реактор за сутки;

$z_5 \in \{4; 8\}$, % – содержание (массовая доля) сухого вещества в сырье;

$z_6 \in \{7,3; 8\}$ – значение водородного показателя, pH;

$z_7 \in \{101; 105\}$, кПа – абсолютное давление в реакторе;

$z_8 \in \{5; 60\}$, мин – продолжительность каждого перемешивания;

В качестве максимизируемого критерия оптимальности использовали удельный выход биогаза Y_6 (УВБ), выраженный в кубических миллиметрах биогаза на килограмм сухого вещества навоза в секунду, $\text{мм}^3/\text{кг} \cdot \text{с}$. Ограничением на параметр оптимизации при проведении экспериментов являлось условие полного обеззараживания сбраживаемой массы, поэтому в каждом опыте определялось содержание патогенной микрофлоры, как в жидкой, так и в твердой фракции отферментированной биомассы. Это позволило

выделить в факторном пространстве допустимую область, в пределах которой возможен поиск максимума параметров оптимизации. Составленный план экспериментов представлен в табл. 1.7. Порядок реализации опытов был рандомизированным во времени.

Таблица 1.7 – Реализация оптимального плана и результаты опытов

№ опы-та	Су-точ-ная за-груз-ка z_1 , %	Тем-ра z_2 , °C	Колво переме-шива-ний z_3 , сут ⁻¹	Частота загруз-ки z_4 , сут ⁻¹	Содер-жа-ние сухого веществ-ва z_5 , %	Водород-ный показа-тель z_6 , pH	Абсо-лют-ное давле-ние z_7 , кПа	Продол-жительность переме-шива-ния z_8 , мин	Удель-ный выход биогаза (опыт), мм ³ /кг·с	Удель-ный выход биогаза (расчет), мм ³ /кг·с
7	10	43	2	2	4	7,5	105	60	148	147
4	15	43	2	2	4	7,5	104	5	181	181
9	10	37	2	2	4	7,3	105	5	171	171
2	10	43	2	1	4	7,3	103	5	108	108
5	10	43	3	2	4	7,3	103	5	146	143
1	10	43	2	2	4	7,3	101	5	138	143
8	10	43	2	2	4	8,0	103	5	157	157
3	10	43	2	2	8	7,3	102	5	155	154
6	10	43	2	2	8	8,0	103	5	167	168
Новый основной уровень										
	10,1	42	3	2	5	7,5	103	5	167	168
Шаг варьирования										
	3	5	0	1	2,5	0,5	0	0		
Опыты на векторе-градиенте										
10	13	37	3	3	7,5	8	103	60	204	273
11	16	32	3	4	10	8	103	60	120	378
Оптимальные значения факторов										
	14	39	3	3	6,6	7,8	103	20		210

По данным таблицы методом регрессионного анализа [55] получена эмпирическая функция регрессии и определены значения статистических характеристик:

$$Y_6 = 53 + 6,85 z_1 - 4,6 z_2 + 34,9 z_4 + 2,83 z_5 + 19,5 z_6 \quad (1.14)$$

$S_{oy} = 3,5 \text{ мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,003$; $\alpha_4 = 0,006$; $\alpha_5 = 0,02$; $\alpha_6 = 0,003$,
где S_{oy} – среднеквадратичное отклонение остаточной ошибки отклика;

α_i – уровни значимости i -тых коэффициентов, не превышающие критический уровень, принятый равным 0,05.

Полученная функция регрессии (1.14) позволяет рассчитать значения параметра оптимизации при всех возможных сочетаниях значимых факторов процесса. Влияние этих же факторов на выход биогаза графически представлено на рис. 1.10.

Из формулы (1.14) и рис. 1.10 следует, что в исследуемой области изменения факторов повышению удельного выхода биогаза (Y_6) способствует увеличение дозы суточной загрузки z_1 , частоты подачи сырья в метантенк z_4 , содержания сухого вещества в исходном навозе z_5 , величины водородного показателя z_6 ; а также снижение температуры z_2 . Остальные факторы процесса (количество перемешиваний z_3 , абсолютное давление в реакторе z_7 , продолжительность перемешиваний z_8) оказались незначимыми. Очевидно, предварительная подготовка навоза в подогревателе-сгустителе обеспечила стабильные показатели сырья по температуре, влажности, однородности, и дополнительное перемешивание сбрасываемой массы в метантенке не оказало заметного действия на процесс ферментации и производство биогаза.

Полученная зависимость удельного выхода биогаза от основных технологических факторов и их численные значения определили направление поиска максимума поверхности отклика. Были спланированы опыты на векторе-градиенте функции цели (опыты 10 и 11). После их реализации оказалось, что максимальное значение УВБ, равное $204 \text{ мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$, достигнуто в опыте 10. В опыте 11 значение УВБ резко снизилось и составило $120 \text{ мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$, т.е. дальнейшее продвижение по градиенту ведет в область неоптимальных значений факторов. В связи с этим опыты были прекращены. Методом интерполяции по трем точкам – на основном уровне, в опытах 10 и 11 – был определен максимум УВБ, который составил $210 \text{ мм}^3/\text{кг}\cdot\text{с}$.

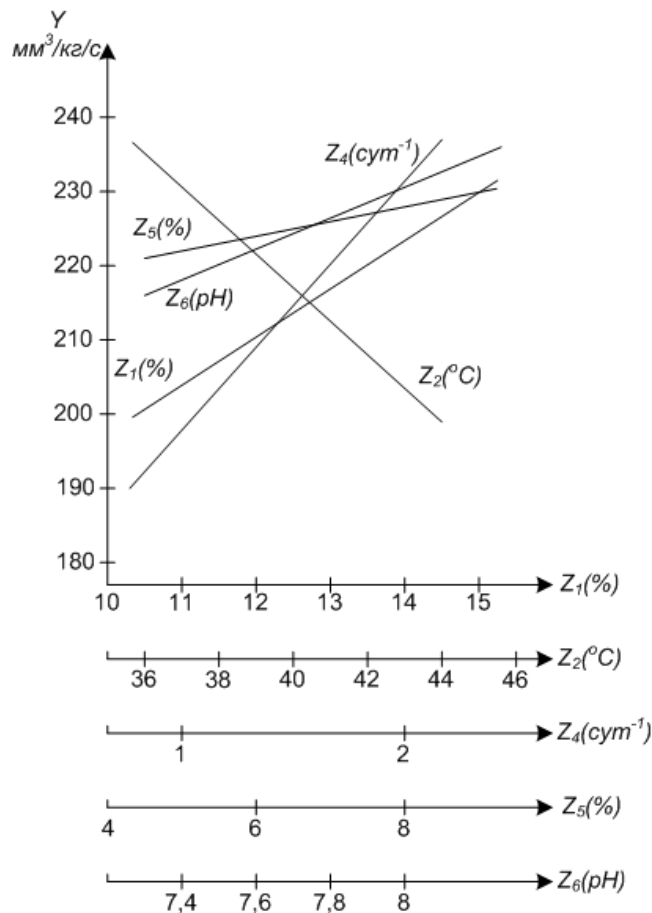


Рисунок 1.10 – Влияние значимых факторов процесса сбраживания на выход биогаза

Соответствующие ему значения факторов, приведенные в таблице 1.8, определяют максимум функции цели параметра оптимизации и являются оптимальными.

Таким образом, по данным экспериментов оптимальным следует считать технологический режим с параметрами:

- доза суточной загрузки – $z_1 - 14 \%$;
- температура ферментации – $z_2 - 39 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- частота загрузки – $z_4 - 3 \text{ сут}^{-1}$;
- содержание сухого вещества в исходном сырье – $z_5 - 6,6 \pm 1 \%$;
- водородный показатель, pH – $z_6 - 7,8 \pm 0,2$.

Что касается параметров z_3 , z_7 , z_8 , то их значения следует принимать в соответствии с результатами предварительных опытов: количество перемешиваний реакционной массы в метантенке – $z_3 - 3 \text{ сут}^{-1}$; абсолютное

давление в метантенке – $z_7 103 \pm 2$ кПа; продолжительность каждого перемешивания массы в метантенке – $z_8 20$ мин.

На эффективность анаэробной ферментации влияет не только режим брожения в метантенке, но и характер подготовки исходного сырья перед загрузкой в биореактор. Сырье, поступающее в метантенк, по своим физико-химическим характеристикам должно быть максимально приближено к характеристикам бродящей массы.

В этой связи была проведена серия опытов с целью определения влияния предварительной подготовки навозных стоков на скорость метаногенеза. Содержание сухого органического вещества (6–7 %) в исходном навозе свинофермы соответствовало оптимальному, поэтому в опытах не корректировалось. Величина рН была несколько выше оптимальной – 7,9–8,1.

Процесс подготовки сырья заключался в его подогреве с одновременным перемешиванием. Опыты проводились в подогревателе-сгустителе лабораторной установки (рис. 1.9). Обработку навоза производили путем подогрева до оптимальной температуры (39 °С) в сочетании с выстаиванием смеси в течение 8–12 часов. При периодическом перемешивании масса приобретала консистенцию однородной суспензии без значительных твердых включений, поэтому дополнительное измельчение навоза перед подачей в метантенк не требуется.

В опытах отмечено, что в процессе выстаивания концентрация летучих жирных кислот, являющихся основным питанием для анаэробных метаногенных микроорганизмов, увеличивается в 4 раза (от 35 до 130 мг·экв/л), происходит полное потребление кислорода из рабочей смеси, снижение рН до 7,6–7,8, что свидетельствует об активизации кислотогенной микрофлоры. Кислород потребляют аэробные и факультативно-анаэробные бактерии. Ввиду больших скоростей этот процесс может практически завершиться на стадии подготовки сырья в реакторе небольшого объема. При подаче в метантенк подготовленного таким образом навоза выделение биогаза начинается уже через 2 часа с начала опыта, а содержание метана в нем составляет 48–50 %. Аналогичные наблюдения приведены в работах других авторов [10, 36].

Таким образом, опыты показали, что оптимальный вариант предварительной подготовки навоза при бесподстильном содержании животных

должен включать в себя интенсивное перемешивание и выдерживание сырья при температуре метаногенеза. При этом практически завершается кислотогенная фаза процесса. Основная фаза – метаногенная – проходит в метантенке. За счет изменения физико-химических и реологических свойств сырья на стадии его подготовки резко ускоряются все микробиологические и биохимические процессы в метантенке, увеличивается скорость разложения органических веществ и образования биогаза. Такая организация технологического процесса с разделением его на две стадии – кислотогенную и метаногенную – позволяет значительно интенсифицировать происходящие процессы и сократить весь цикл сбраживания отходов до 8–10 суток.

На основании выполненных нами исследований можно рекомендовать следующую технологию анаэробного сбраживания навозных стоков свинофермы.

Проводится предварительная подготовка навоза, включающая подогрев сырья до температуры сбраживания ($39\text{ }^{\circ}\text{C}$), периодическое в течение 20 мин перемешивание и выдерживание массы не менее 8 часов при оптимальной температуре. Содержание сухого органического вещества поддерживается на уровне 6–7 %, pH – 7,6–7,9.

В метантенке поддерживается температура $39 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Доза суточной загрузки метантенка составляет 14 %. Осуществляется двадцатиминутное трехразовое в течение суток перемешивание сырья. Давление биогаза в биореакторе поддерживается на уровне 103 кПа. Продукционный газ собирается в газгольдере.

В сырье, подвергнутом брожению, систематически контролируется концентрация условно-патогенной микрофлоры и жизнеспособных яиц гельминтов.

Глава 2. ИНЖЕНЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАНОВОГО СБРАЖИВАНИЯ

В результате анаэробной переработки органических отходов образуются первичные продукты (биогаз, сброженная масса), которые затем перерабатываются во вторичные (конечные) продукты – тепловую, электрическую энергию, органо-минеральные удобрения. На рис. 2.1 приведена принципиальная схема комплексной переработки органических отходов методом метанового сбраживания. На разных этапах обработки исходного сырья и продуктов сбраживания используется оборудование как специального, так и общетехнического назначения.

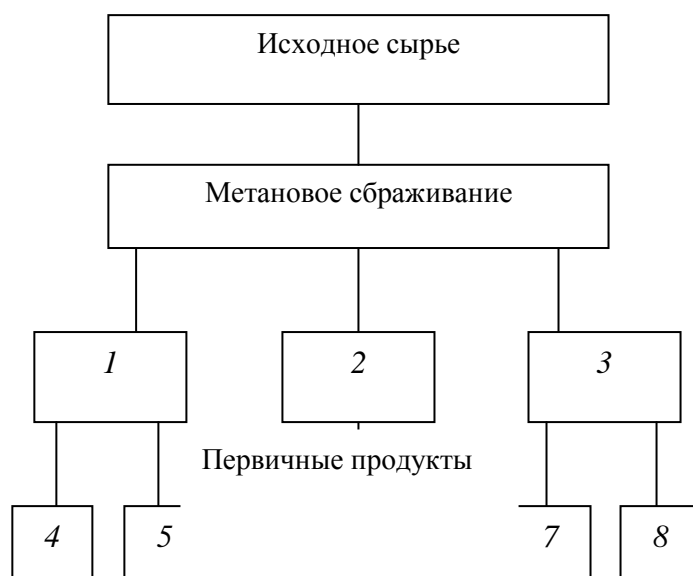


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема комплексной переработки органических отходов методом метанового сбраживания. 1 – биогаз; 2 – обезвоженный шлам; 3 – сброженная масса; 4 – электрическая энергия; 5 – гумус или компост; 7 – доочистка; 8 – жидкие органо-минеральные удобрения

ой переработки отходов органических: 1 – биогаз; 2 – обезвоженный шлам; 3 – сброженная масса; 4 – электрическая энергия; 5 – гумус или компост; 7 – доочистка; 8 – жидкие органо-минеральные удобрения

При разработке принципиальной технологической схемы целесообразно производить разделение всего технологического процесса на отдельные этапы. Это позволит точнее выбрать оборудование, обеспечивающее

выполнение необходимых технологических операций на данном этапе. Пример такого разделения технологии на этапы схематично представлен на рис.2.2.

При реализации приведенной схемы в зависимости от принимаемых технических решений могут возникать дополнительные взаимосвязи между этапами. Например, при сбраживании отходов в термофильном режиме возможно использование жидких стоков как источника низкопотенциального тепла для подогрева сырья.

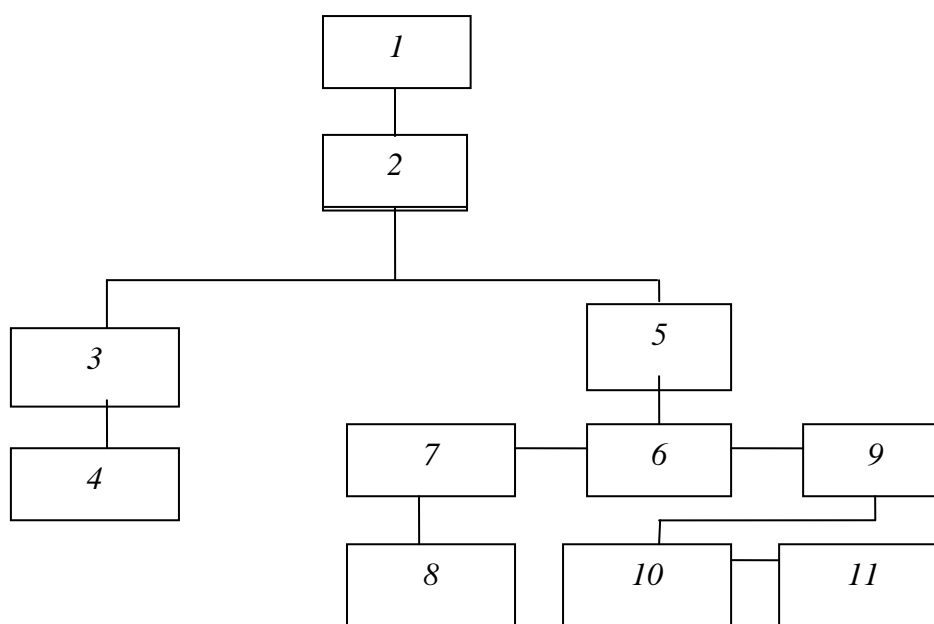


Рисунок 2.2 – Основные этапы технологического процесса метанового сбраживания отходов: 1 – сбор и подготовка исходного сырья; 2 – метановое сбраживание; 3 – сбор биогаза; 4 – переработка биогаза в тепловую и электрическую энергию; 5 – сбор отферментированной массы; 6 – разделение отферментированной массы на фракции; 7 – сбор обезвоженного шлама; 8 – переработка обезвоженного шлама; 9 – сбор жидких стоков; 10 – дополнительная обработка жидких стоков; 11 – приготовление жидких органо-минеральных удобрений

В этом случае этап 9 – сбор жидких стоков – может быть увязан с этапом 1 – подготовка исходного сырья. В других случаях возможно использование тепла жидких стоков в системе теплового насоса. Тогда этап 9 может быть увязан с этапом 3, если на этом этапе предусмотрено компримирование биогаза. Возможны и другие взаимосвязи между этапами. Так, если на этапе 4 продуктом утилизации биогаза будет водяной пар, то подог-

рев исходного сырья (особенно вязкого) на этапе 1 рационально осуществлять острым паром. В системе навозоудаления фермы вместо чистой воды можно использовать жидкие стоки, полученные на этапе 10. Жидкие стоки (этап 9) могут использоваться на этапе 8 при компостировании или производстве биогумуса.

При разработке технологической схемы необходимо также учитывать особенности эксплуатации оборудования в условиях животноводческого комплекса. В системах обвязки аппаратов узким местом является уплотнение арматуры и насосов, поскольку здесь могут возникать течи. Поэтому при разработке технологической схемы необходимо минимизировать количество уплотняемых соединений, а также количество операций, связанных с включением насосов и переключением задвижек.

Например, операция загрузки сырья в метантенк с помощью насоса осуществляется по следующей схеме (рис. 2.3):

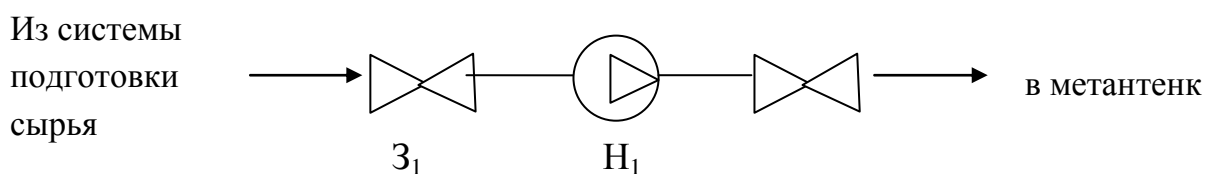


Рисунок 2.3 – Схема загрузки сырья в метантенк

Эту операцию можно выполнять двумя способами:

I способ – открыть задвижку Z_1 или Z_2 и включить насос I

II способ – задвижки Z_1 и Z_2 постоянно открыты, насос находится под заливом, и для загрузки сырья требуется только его включить. В этом случае должно быть предусмотрено соответствующее взаимное расположение насоса, задвижек и труб: насос – внизу на нулевой отметке, а точки забора и слива сырья должны находиться выше.

Управление технологическим процессом должно быть максимально удобным для аппаратчика, так как на установках производительностью до 100 т/сут. по исходному сырью степень автоматизации процесса невысока и, как правило, используется ручное управление насосным и запорным оборудованием.

2.1. Подготовка исходного сырья к сбраживанию

Способ подготовки исходного сырья к сбраживанию существенно влияет на общий ход процесса анаэробной переработки отходов и в значительной степени определяет структуру технологической схемы в целом.

Состав установки для подготовки сырья зависит от ряда параметров, основными из которых являются:

- суточный объем отходов животноводческого комплекса, доза суточной загрузки в метантенк, доза разовой загрузки;
- содержание сухого вещества в отходах;
- состав и свежесть отходов;
- начальная температура отходов;
- значение водородного показателя pH;
- размер и количество крупных включений;
- соотношение С : N в отходах.

Для обеспечения оптимальных значений этих параметров, соответствующих нормам технологического режима, на этапе подготовки сырья должны быть решены следующие задачи:

- организация сбора и накопления исходного сырья;
- обеспечение необходимого соотношения С : N и влажности сырья;
- удаление крупных твердых включений;
- измельчение твердых частиц и гомогенизация сырья;
- подогрев исходного сырья до температуры сбраживания.

2.1.1. Сбор и накопление исходного сырья

При проектировании системы сбора и накопления исходного сырья следует учитывать принятую в конкретном хозяйстве систему удаления отходов из помещений для животных, суточный объем отходов и их состав. При этом необходимо как можно быстрее собирать и подавать сырье в биореактор, так как длительное его пребывание в каналах и навозосборниках приводит к разложению навоза и снижению выработки биогаза. Система удаления навоза должна предусматривать оборудование для смыва, откачки, удаления скребками или вывоза навоза из помещения в место его сбора. Объем накопителей-навозосборников обычно рассчитывают на 1,5–2-х суточную производительность биогазовой установки.

Для сбора и накопления жидкого навоза чаще всего применяют металлические или железобетонные емкости горизонтального типа, снабженные, как правило, перемещающими устройствами.

Вместимость аппарата для подготовки сырья должна соответствовать дозе разовой загрузки метантенка. Количество загрузок метантенка в течение суток определяется принятой технологией. Доза разовой загрузки определяется по формуле

$$\ddot{A}_{\delta} = \frac{\ddot{A}_{\bar{n}}}{n}, \quad (2.1)$$

где \ddot{A}_{δ} – доза суточной загрузки; n – количество загрузок в сутки.

Доза суточной загрузки равна количеству исходного сырья, которое рассчитывают как сумму отходов различного происхождения:

$$\ddot{A}_{\bar{n}} = B_{\bar{y}} + \hat{A}_i, \quad (2.2)$$

где $B_{\bar{y}}$ – суточный выход экскрементов, кг; B_i – суточный выход хозяйственно-бытовых стоков, стоков доильного отделения, убойного цеха и т.д., кг;

Суточный выход жидкого навоза зависит не только от количества экскрементов, а также от количества подстилочных материалов, технологической воды, остатков кормов и других включений. Большое количество воды используется для мойки и дезинфекции оборудования фермы, уборки навоза и мойки полов. Вместе с экскрементами удаляется также некоторое количество кормов – это малопригодные для пищи включения, а также корма, выброшенные из кормушек. Доля кормов, поступающих в отходы, как правило, не превышает 10 % от массы экскрементов. Среди посторонних включений встречаются щепки, палки, обрывки ткани, песок, почва и др. Некоторые включения попадают в систему удаления отходов при чистке полов, а также входят в состав кормовых смесей, особенно при кормлении свиней пищевыми отходами, а крупного рогатого скота – плохо промытыми корнеплодами и загрязненным силосом. Изобилие различных добавок и включений в навозных стоках требует проведения тщательного анализа состава отходов для определения их суточного выхода.

Суточный выход экскрементов $B_{\bar{y}}$ можно определить, руководствуясь нормативами [1]:

$$B_{\bar{y}} = B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_n, \quad (2.3)$$

где $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ – выход экскрементов животных конкретного вида

или одной возрастной группы, кг/сутки:

$$\hat{A}_n = n \cdot b_n, \quad (2.4)$$

где b_n – выход экскрементов на одну голову для конкретного вида или одной возрастной группы, кг/сутки;

n – количество животных данного вида или данной конкретной возрастной группы, гол.

Данные о суточном выделении экскрементов от различного вида животных и нормах расхода воды на нужды комплексов приведены в табл. 2.1 – 2.5 [1].

Таблица 2.1– Среднесуточный выход экскрементов на предприятиях крупного рогатого скота

Животные	Выход экскрементов, кг/сут		
	всего	кал	моча
Быки-производители	40	30	10
Коровы	55	35	20
Молодняк на откорме в возрасте, мес.:			
до 4	7,5	5	2,5
4 – 6	14,0	10	4
6 – 12	26,0	14	12
старше 12	35,0	23	12

Таблица 2.2 – Среднесуточный выход экскрементов на свинофермах

Показатели	Хряки	Свиноматки			Поросята в возрасте, дней			Свиньи на откорме массой, кг	
		холостые	супоросные	подсосные	26–42	43–60	60–105	до 70	более 70
Экскременты: масса, кг	11,11	8,8	10,0	15,3	0,4	0,7	1,8	5,0	6,5
влажность, %	89,4	90,0	91,0	90,1	90,0	86,0	86,1	87,0	87,5
в том числе, кал: масса, кг	3,86	2,46	2,6	4,3	0,1	0,3	0,7	2,05	2,7
влажность, %	75,0	73,8	73,1	73,1	70,0	71,0	71,4	73,0	74,7
моча: масса, кг	7,24	6,34	7,4	11,0	0,3	0,4	1,1	2,95	3,8
влажность, %	97,0	97,5	98,3	96,8	96,7	96,0	96,3	96,7	96,9

Таблица 2.3 – Расход воды на промывку каналов навозоудаления

Система удаления навоза из животноводческих помещений	Нормы расхода воды на одно животное, л/сут		
	свиньи при групповом содержании	крупный рогатый скот на фермах	
		откорма и нетелей	молочного направления
Самотечная система:			
непрерывного действия	1,5	8	15
периодического действия	7	15	30
Гидросмывная система (баки, насадки)	20	–	–

Таблица 2.4 – Нормы расхода воды на мытье кормушек и уборку помещений свиноводческих предприятий на 1 голову

Группа животных	Норма расхода воды, л/сут
Хряки-производители	7,5
Матки:	
супоросные и холостые	7,0
подсосные с приплодом	20,0
Поросята-отъемыши	1,5
Ремонтный молодняк	4,5
Свиньи на откорме	4,5

Суточный выход жидкого навоза V_n определяется:

$$V_i = \hat{A}_y + \hat{I} + \hat{I} + \hat{E} + \zeta, \quad (2.5)$$

где M – масса воды, поступающей в систему удаления, кг/сут.;

Π – масса подстилки, используемой на ферме, кг/сут.;

K – масса кормов, попавших в систему навозоудаления, кг/сут.;

$З$ – масса земли, песка и других включений, кг/сут.

Таблица 2.5 – Суточный выход помета птицы

Вид птицы		Куры яичного направле- ния: роди- тельское стадо	Промыш- ленное стадо	Мясные куры	Индейки	Утки	Гуси
Взрослое поголовье		189	175	276–300	450	423	594
Возрастные группы молодняка (в днях)	до 30	–	24	–	–	–	330
	31–60	–	97	–	–	–	480
	61–150	–	176	–	–	–	–
	1–63	–	–	158	–	384	–
	64–140	–	–	–	–	–	–
	14–180	–	–	–	–	–	–
	1–56	–	–	135	175	382	–
	1–119	–	–	–	–	–	–
	12–210	–	–	–	–	–	–
	20–240	–	–	–	–	–	–
	57–112	–	–	–	364	–	–
	12–161	–	–	–	420	–	–
	64–240	–	–	–	–	–	495

Примечания: 1. Влажность помета кур и индеек 73–78 %; гусей и уток 83–85 %. 2. При клеточном содержании кур усушка помета через 8 ч. – 10 %, 12 ч. – 13 %, 24 ч. – 27 %; объемная масса помета 0,7–0,8 т/м³, зольность 17,3 %.

Суточный выход навоза (т/сут) можно определять по формуле [2]

$$\hat{A}_r = 0,001(D_{\dot{y}} + D_{\dot{r}} + D_{\dot{a}} + D_{\dot{r}\delta}) \cdot n, \quad (2.6)$$

где P_3 – суточный выход экскрементов от одного животного, кг;

P_n – суточное количество воды, добавляемое в систему навозоудаления в расчете на одно животное с учетом мытья кормушек, полов, промывки навозосборных каналов, подтекания водопроводных кранов и автопоилок, л;

P_d – суточное количество воды, приходящееся на одно животное при дополнительном разбавлении навоза сточными водами, образующимися в доильных и молочных залах, кормоцехах и других объектах фермы, л;

$P_{пр}$ – количество механических включений, поступающих в систему навозоудаления за сутки в расчете на одно животное производственной группы (принимается от 1 до 7 % для навоза крупного рогатого скота и от 0,2 до 1 % от общей массы экскрементов для свиного навоза), кг ;

n – количество животных, находящихся в одной производственной группе, голов.

Ниже приведен пример расчета по формуле (2.6) суточного выхода навоза для свинофермы с содержанием различных возрастных групп животных.

Пример определения суточного выхода навоза свинофермы

Определить суточный выход навоза и содержание в нем сухого вещества для свиноводческой фермы с поголовьем 5000 животных. На ферме содержится 200 свиноматок, 1000 голов поросят весом 25–30 кг, 1000 голов свиней весом 50 кг; 1500 голов на откорме весом до 70 кг и 1300 голов весом более 70 кг. Содержание свиней – групповое; свиноматки и поросята весом 25–30 кг содержатся с подстилкой. Система навозоудаления комбинированная (смыв и скребковые транспортеры). При ферме имеется убойный цех, объем стоков которого составляет 10 м³/сут. влажностью 100 %.

1. Суточный выход навоза от свиноматок, содержащихся с подстилкой:

$$B_n = 0,001(P_э + P_n + P_d + P_{пр}) n,$$

где $P_э$ и P_n принимается по табл. 2.2 и 2.4 соответственно; $P_э = 15,3$ кг/гол; $P_n = 7,0$ кг/гол; P_d принимаем равным 0, так как объем дополнительных стоков указан в исходных данных отдельно. $P_{пр} = 0,2 \div 1$ % от $P_э$; принимаем $P_{пр} = 0,6$ %, что составляет: $0,006 \times 15,3 = 0,09$ кг/гол;

тогда

$$B_n = 0,001(15,3 + 7 + 0,09) \times 200 = 4,478 \text{ т/сут.}$$

2. Суточный выход навоза от поросят весом 24–30 кг, содержащихся с подстилкой:

$$B_n = 0,001(0,4 + 1,5 + 0,006 \times 0,4) \times 1000 = 1,9 \text{ т/сут.}$$

3. Суточный выход навоза от свиней, содержащихся без подстилки:

$$B_n = n_1 b_1 + n_2 b_2 + n_3 b_3,$$

где n_1, n_2, n_3 – количество свиней весом 50 кг, до 70 кг и более 70 кг;

b_1, b_2, b_3 – среднесуточный выход экскрементов по данным табл. 2.2.

$$B_n = 0,7 \times 1000 + 5 \times 1500 + 6,5 \times 1300 = 16650 \text{ кг/сут.} = 16,65 \text{ т/сут.}$$

Таким образом, суммарный суточный выход навоза B_n составляет:

$$B_n = 4,478 + 1,9 + 16,65 = 23 \text{ т/сут} = 23000 \text{ кг/сут.}$$

4. Определим содержание сухого вещества (СВ) в навозе. В соответствии с данными табл. 2.2 влажность экскрементов свиноматок составляет 90,1 %; тогда масса сухого вещества в них:

$$15,3 \times 200 \times (1 - 0,901) = 302,94 \text{ кг.}$$

Аналогично определим количество сухого вещества в навозе поросят:

$$1900 \times (1 - 0,9) = 190 \text{ кг,}$$

а также в навозе свиней весом 50 и более кг:

$$0,7 \times 1000 (1 - 0,86) = 98 \text{ кг;}$$

$$5 \times 1500 (1 - 0,87) = 975 \text{ кг;}$$

$$6,5 \times 1300 (1 - 0,875) = 1056,25 \text{ кг.}$$

Суммарное содержание СВ в навозе свиней составляет 2622,19 кг,

или $\frac{2622,19 \times 100}{23000} = 11,4 \%$; соответственно влажность навоза составляет

88,6 % . Учитывая высокую влажность навоза, принимаем его плотность равной плотности воды.

При смешивании навоза со стоками убойного цеха суммарный суточный выход стоков будет:

$$23,0 \text{ м}^3/\text{сут} + 10 \text{ м}^3/\text{сут} = 33 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Тогда содержание сухого вещества в смешанных стоках составит

$$\frac{2692,19 \times 100}{33000} = 8,15 \% , \text{ а их влажность} - 91,85 \% .$$

2.1.2. Подготовка исходного сырья к сбраживанию

Физико-химические характеристики исходного субстрата, поступающего на сбраживание в метантенк, во многом определяют эффективность процесса брожения и качество производимого биогаза. Поэтому сырье перед подачей в метантенк должно быть соответствующим образом подготовлено и оптимизировано по составу и параметрам технологического режима сбраживания (влажность, температура, значение pH).

Существуют различные способы такой подготовки. Некоторые из них, используемые для обеспечения необходимой влажности сырья и удаления из него посторонних включений, представлены схематически на рис 2.4.

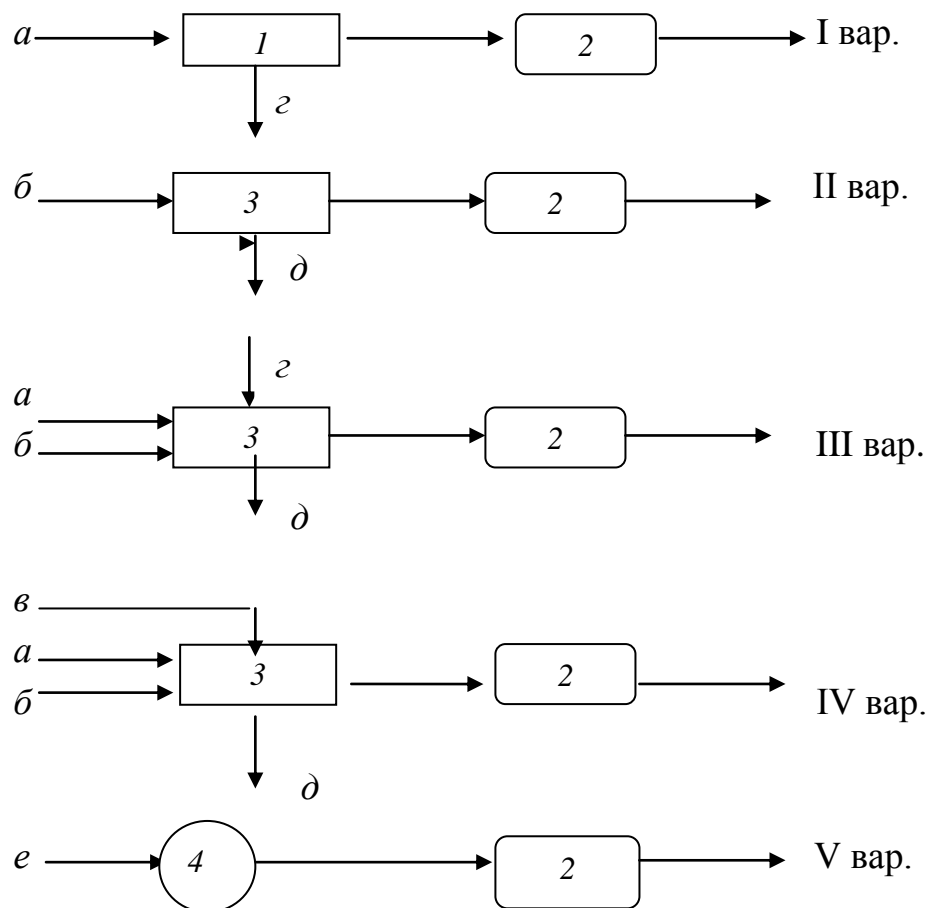


Рисунок 2.4 – Некоторые варианты схем подготовки исходного сырья для разных видов животных птицы: 1 – отделитель крупных включений; 2 – измельчитель; 3 – отделитель крупного подстилочного материала; 4 – отделитель пуха; a – бесподстилочный навоз; b – подстилочный навоз; c – хозяйственно-бытовые стоки, канализация; c – жидкие стоки узла разделения; d – крупные включения подстилки; e – птичий помет, содержащий пух

Влажность сырья имеет большое значение не только для самого процесса сбраживания, но и для эффективной эксплуатации оборудования, так как обрабатываемая среда должна беспрепятственно транспортироваться по трубам с помощью насосов и запорных устройств. При проектировании установок метанового сбраживания влажность исходного сырья обычно принимают равной $90 \pm 1 \%$.

2.1.2.1. Отделение крупных включений из сырья

Количество и размер твердых частиц, содержащихся в сырье, в значительной степени влияют на работу биогазовой установки.

Данные о гранулометрическом составе и гидравлической крупности твердых частиц жидкого навоза приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Гранулометрический состав и крупность частиц жидкого навоза

Показатель	Размер частиц, мм							Источник информации
	менее 1	1–2	2–3	3–5	5–7	7–10	более 10	
Содержание, %	32,5	37,5	12,5	8	5	3	1,5	[3]
	8–14	29,76	13,96	7,5	6,54			[4]
	8–25	17–29	12–21	12–21	6,5–7			[5]
Гидравлическая крупность, мм/с	21–15	28–1	36–28	52–36	–	–	–	[3]

Из приведенных данных видно, что основная масса твердых частиц в навозе имеет размер менее 10 мм. Однако на практике в отходах животноводческого комплекса могут встречаться посторонние твердые примеси и более крупного размера. Это различные растительные остатки, металлические, деревянные включения, которые могут вызывать поломку перемешивающих устройств, насосов, центрифуги, забивание трубопроводов.

Для удаления подобных примесей используются специальные устройства. К ним относятся решетки различных конструкций. Они изготавливаются из круглых и прямоугольных стержней и бывают различных типов: подвижные и неподвижные, с механической и ручной очисткой, устанавливаемые вертикально и наклонно (как при самотечной, так и при напорной подаче стоков). Если количество твердых крупных примесей, содержащихся в суточном объеме навоза, не превышает $0,1 \text{ м}^3$, то устанавливаются решетки с ручной очисткой. При большем количестве загрязнений применяют решетки с механическими граблями. Для задержания и одновременного измельчения крупных включений непосредственно в потоке навоза применяют решетки-дробилки типа РД. Решетка-дробилка состоит

из щелевого барабана с трепальными гребнями и приводного механизма. Жидкий навоз подается на вращающийся барабан. При этом мелкие загрязнения вместе со стоками проходят через щель внутрь барабана, а крупные задерживаются на нем и измельчаются. Измельченные примеси также с потоком навоза поступают внутрь барабана и выходят из решетки-дробилки. Характеристика решеток-дробилок приведена в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Основные параметры решеток-дробилок

Марка	Производительность, м ³ /ч	Размер решетки, мм	Суммарная площадь щелей, см ²	Мощность, кВт	Масса, кг
РД–200	60, 90	180 (диам.)	190	0,6	320
РД–600	2000	635 (диам.)	450	1	1800
КРД	2000	760 (диам.)	8350	4,6	750
РРД–1	3000	1400 × 900	9600	17,6	2635
РРД–2	6000	2 × 1400 × 900	19200	18,2	3500
ВРД–1	3000–4000	1024 × 1640	7000	14,5	2430
ВРД–2	3500–5000	1024 × 2040	900	16	1880

Примечание: К – круглые; В – вертикальные; Р – радиальные

Нами разработано несколько конструкций аппаратов – ловушек для отделения крупных включений из навоза, одна из которых представлена на рис. 2.5.

Ловушка представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат с коническим днищем, укрепленный на раме 1. Внутри герметичного наружного корпуса 9 расположен перфорированный корпус 2, поверхность которого выполнена из просечно-вытяжного листа с отверстиями в виде чешуек 8. Внутри корпуса 2 расположен вал 5 с приводом 6 и транспортирующим устройством скребкового типа 7. Ловушка оборудована устройством для очистки перфорированного корпуса, имеющим не менее 2-х опоясывающих кожух кольцевых каналов 11 с радиальными отверстиями 12, к которым через патрубок 10 подводится промывная жидкость под давлением.

Устройство работает следующим образом. Жидкий навоз через штуцер 3 поступает в перфорированный цилиндрический корпус 2 и через отверстия 8 поступает в полость между корпусом 2 и наружным корпусом 9. Крупные включения из навоза задерживаются на внутренней поверхности

корпуса 2, а навоз через патрубок 4 поступает в коммуникации установки. Выгрузка крупных включений осуществляется при перекрытом штуцере 3 и открытой задвижке в штуцере 13.

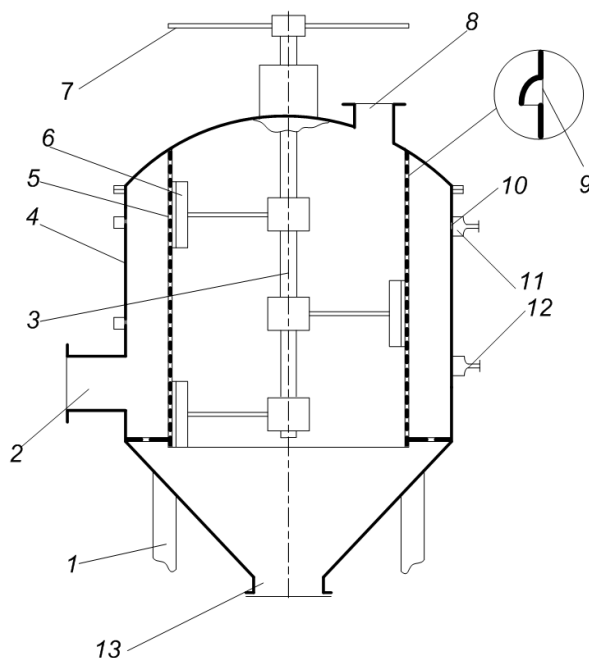


Рисунок 2.5 – Конструкция аппарата-ловушки: 1 – рама; 2, 8, 12, 13 – штуцеры; 3 – вал; 4 – наружный корпус; 5 – перфорированный внутренний корпус; 6 – скребок; 7 – привод; 9 – вид перфорации; 10 – отверстия для промывки; 11 – кольцевой промывной канал

При этом через патрубок 10 по кольцевым каналам 11 к отверстиям 12 поступает промывная жидкость, которая промывает перфорированную поверхность корпуса 2 и полость между корпусами 2 и 9, а вращающийся скребок удаляет с рабочей поверхности корпуса 2 отложившиеся на ней твердые включения.

Ниже приведена техническая характеристика аппарата-ловушки, который успешно эксплуатировался в составе установки "Биогаз-301С":

объем	0,3 м ³
диаметр	600 мм
высота	375 мм
масса	212 кг
материал	углеродистая сталь.

Имеется опыт использования двух последовательно установленных

ловушек, одна из которых предназначена для грубой очистки, другая – для тонкой очистки стоков от твердых включений. Каждая ловушка имеет корзину-корпус, изготовленную из перфорированного листа; диаметр отверстий в корзине для грубой очистки – 30 мм, для тонкой очистки – 10 мм. Жидкий навоз поступает внутрь корзины-корпуса и проходит сквозь перфорацию, оставляя внутри корзины крупные твердые включения. По мере заполнения корзин они вынимаются из цилиндрических корпусов и опорожняются.

При переработке подстилочного навоза возникает задача отделения от него крупных частиц соломы, т.к. измельчить влажную солому достаточно сложно. Перед отделением соломы подстилочный навоз необходимо разбавить водой. Извлечение подстилки можно производить на инерционных наклонных грохотах или дуговых ситах. В частности, возможно использование типового 2-х ярусного инерционного грохота ГИЛ, в конструкцию которого необходимо внести некоторые изменения, а именно: вместо нижней фильтрационной перегородки 4 с отверстиями до 2-х мм необходимо установить перегородку, аналогичную верхней, с диаметром перфорации 20 мм. Схема грохота показана на рис. 2.6

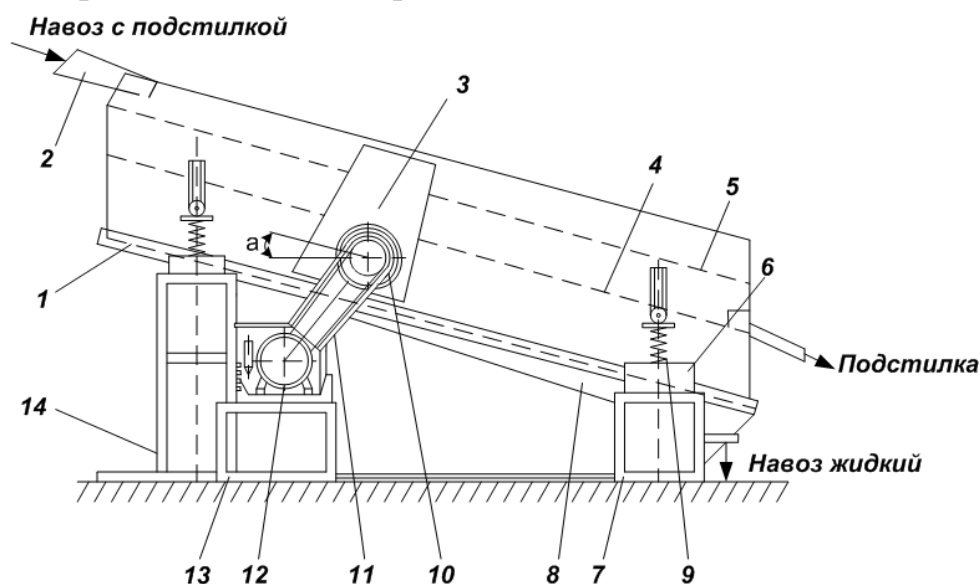


Рисунок 2.6 – Схема инерционного наклонного грохота ГИЛ: 1 – корпус; 2 – распределительный лоток; 3 – ограждение дебаланса; 4 – нижняя фильтровальная перегородка; 5 – верхняя фильтровальная перегородка; 6 – промежуточная опора; 7 – стойка; 8 – поддон; 9 – пружинная опора; 10 – инерционный вибратор; 11 – клиноременная передача; 12 – электродвигатель; 13 – подмоторная рама; 14 – рама.

2.1.2.2. Измельчение исходного сырья

Одним из условий эффективной переработки сырья в биореакторе является активный массообмен на поверхности твердой и жидкой фаз субстрата, содержащего взвешенные вещества. Для обеспечения развитой поверхности массообмена необходимо предварительно измельчить содержащиеся в сырье твердые материалы, особенно растительного происхождения.

Перед подачей сырья на измельчение его необходимо тщательно перемешать, и с этой целью навозосборники животноводческих ферм оборудуют устройствами для взмучивания осадка и гомогенизации навозной массы.

Существует несколько способов перемешивания жидких сред, например, циркуляционное перемешивание путем многократного прокачивания жидкости через систему сборник – циркуляционный насос – сборник или механическое перемешивание с использованием мешалок различных типов.

В зависимости от частоты вращения мешалки могут быть быстроходные (частота вращения до 40 с^{-1}) и тихоходные (частота вращения не более 1 с^{-1}). К тихоходным мешалкам относятся лопастные, рамные, якорные, к быстроходным – турбинные и винтовые. Мешалки располагаются вертикально; возможна их установка в несколько ярусов на одном валу. В биогазовой установке «КОБОС-1» [6] перемешивание исходного сырья с одновременным измельчением твердых частиц проводили в навозосборнике с помощью насоса НЦИ-Ф-100. Насос, погруженный в навоз, забирает его снизу и по одному из открытых шланговых затворов в распределительной гребенке перекачивает обратно в навозосборник. При этом происходит взмучивание осадка, смешивание различных слоев сырья, поступающего с фермы, гомогенизация и усреднение состава сырья.

Тонкое измельчение может быть осуществлено измельчителем ИН-Ф-50 (рис. 2.7), который обеспечивает измельчение длиноволокнистых включений размером не более 150 мм. Он может работать непрерывно в течение 7 ч в сутки в закрытых помещениях при содержании в навозе не более 5 % грубых механических включений. По данным испытания опытного образца комплекса «КОБОС-1», устройство обеспечивало измельчение частиц навоза до размера 1,3 мм.

Измельчители ИНФ-50 и насосы НЦИ-Ф-100 изготавливаются на ООО

«Башкирский завод сельхозмашин».

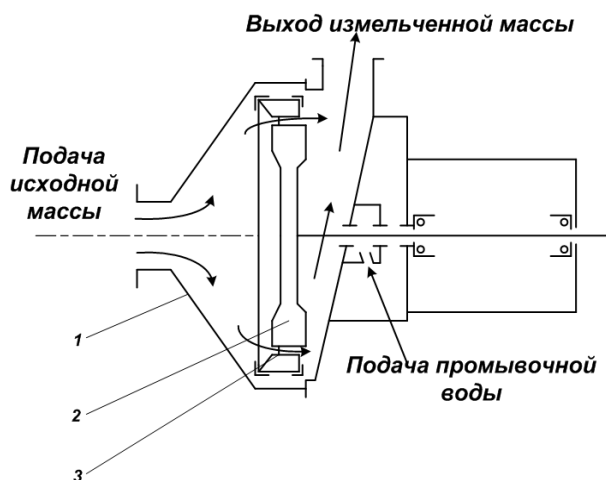
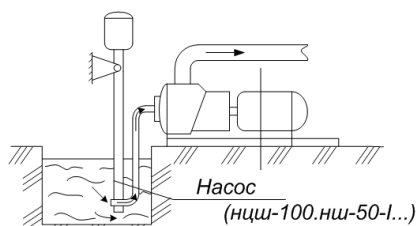


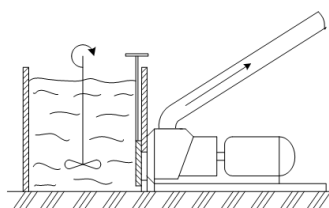
Рисунок 2.7 – Кинематическая схема измельчителя навоза ИНФ-50:

1 – корпус; 2 – подвижный дисковый нож с пазами и твердосплавными пластинами; 3 – неподвижный кольцевой нож со специальными режущими кулачками

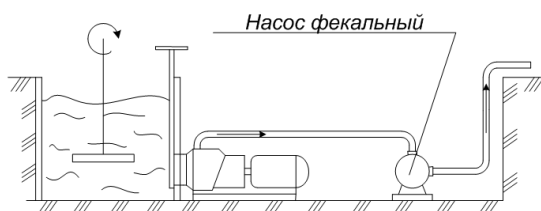
В зависимости от конкретных условий размещения измельчителя его монтаж может осуществляться по одному из вариантов, приведенных на рис. 2.8.



Вариант «А»



Вариант «Б»



Вариант «В»

Рисунок 2.8 – Схема установки измельчителя ИНФ-50

2.1.2.3. Подогрев исходного сырья

Подогрев сырья до оптимальной температуры сбраживания особенно важно производить в холодное время года, так как при загрузке в метантенк холодных стоков заметно снижается активность микроорганизмов.

Предварительный подогрев исходного навоза осуществляют, главным образом, за счет продукционного биогаза. Количество биогаза, расходуемого на подогрев сырья, зависит от ряда факторов, в том числе от принятого в данной технологии способа подогрева стоков; температуры наружного воздуха, температуры исходного сырья и др. В табл. 2.8 приведены данные по расходу биогаза на технологические нужды для наиболее известных отечественных и зарубежных фирм.

В практике эксплуатации биогазовых установок используются следующие способы предварительного подогрева сырья:

- сырье в объеме дозы разовой (при многократной загрузке) или дозы суточной загрузки (при однократной загрузке) подогревают до температуры сбраживания и перегружают в метантенк;
- сырье подогревают до температуры сбраживания, выдерживают определенное время и затем перегружают в метантенк;
- загружаемое сырье нагревают до более высокой температуры, чем температура сбраживания.

На установках, действующих по технологии одностадийного сбраживания, преимущественно применяют нагрев исходного сырья до температуры брожения с немедленной его перегрузкой в метантенк. На установках с двухстадийным сбраживанием применяют метод выдерживания подогретого сырья в кислотном реакторе, где проходят процессы первой стадии брожения, – гидролиз и ацетогенез – после чего субстрат перегружают в метантенк, где проходит вторая стадия – метаногенез.

Метод перегрева сырья до 70° С с выдержкой в течение часа используют некоторые фирмы Германии [11] с целью его обеззараживания.

Таблица 2.8 – Данные по расходу биогаза на технологические нужды для биогазовых установок различных фирм

Наименование показателей	Страна, установка (фирма)							
	Финляндия, «Энбом»	Латвия, с-з Огре	Швеция, Биосистем	Англия, Бритишбиогаз	Нидерланды, BTG	Украина, КОБОС 1	Украина, Биогаз 301 С	Украина, Биогаз 5-61 С
Доза суточной загрузки, м ³ /сут	7	20	12	18	80	25	30	50
Температура сбраживания, С	35–40	54	50	35	32–34	40	42	42
Способ подогрева сырья	горячей водой	горячей водой	горячей водой	горячей водой	горячей водой	горячей водой	горячей водой	горячей водой
Расход биогаза на подогрев сырья по отношению к производительности установки по биогазу, %	40	48	62	52	50	42	45	53
Источник информации	[7]	[7]	[7]	[7]	[8]	[6]	[9]	[10]

При выборе способа предварительного подогрева сырья следует учитывать энергетические затраты, имея ввиду, что расход тепла для подогрева дозы разовой загрузки до температуры термофильного сбраживания в 1,5 раза больше, чем для нагрева до температуры мезофильного брожения.

Наиболее распространенные схемы подогрева исходного сырья показаны на рис. 2.9.

Как видно из рисунка, во всех схемах используются сборники исходного сырья, вместимость которых определяется дозой разовой или суточной загрузки. Кроме того, сборники могут выполнять функции дозатора, подогревателя, подогревателя-выдерживателя в зависимости от принятой технологии метанового сбраживания. Подогрев исходного сырья до температуры сбраживания может осуществляться различными теплоносителями.

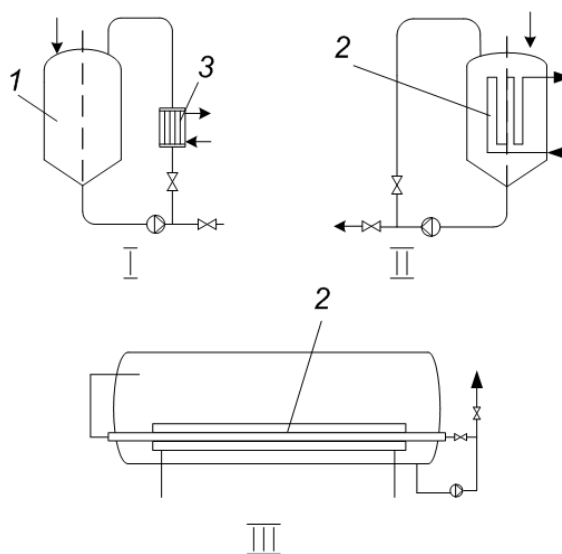


Рисунок 2.9 – Принципиальные схемы подогрева исходного сырья:
 I – с выносным теплообменником; II–III – со встроенным теплообменником; 1 – сборник; 2 – нагревательный элемент; 3 – теплообменник

Наибольшее распространение получили трубчатые водяные теплообменники. Однако типовые кожухотрубчатые теплообменники в стандартном исполнении неудобны в эксплуатации, так как взвешенные твердые частицы налипают на поверхности труб, ухудшая теплообмен и затрудняя прохождение среды. Поэтому используются теплообменники с прямыми вертикально или наклонно расположенными трубами большего диаметра, чем стандартный. Температура теплоносителя в межтрубном пространстве должна быть не выше 65–70 °С.

Двухтрубные теплообменники типа «труба в трубе» позволяют обеспечить эффективный теплообмен между теплоносителями. Для удобства чистки и замены внутренних труб, по которым циркулирует исходное сырье, их соединяют коленами на фланцевых разъемах. Основным недостатком теплообменников данного типа является большая металлоемкость и габариты.

На рис. 2.9 – III показана схема подогрева сырья в сборнике со встроенным нагревательным элементом. По такой схеме производится подготовка исходного сырья на биоэнергетической установке «КОБОС–1». Сборник сырья представляет собой горизонтальный цилиндрический стальной аппарат со встроенным теплообменником типа «труба в трубе». Из емкости сборника навозная масса насосом подается во внутреннюю

трубу теплообменника, а затем перекачивается обратно. В пространство между внутренней и наружной трубой теплообменника подается теплоноситель – вода с температурой 65–70 °С. По данным авторов разработки, для поддержания жизнеспособности бактерий при работе метантенка в термофильном режиме (55 °С), достаточно нагревать сырье в подогревателе-выдерживателе до температуры не выше 40 °С. Это позволяет снизить затраты энергии на процесс сбраживания на 6–10 %.

При двухстадийном сбраживании подогреватель-выдерживатель такой конструкции может выполнять функции первого (кислотного) реактора.

По схеме II рис. 2.9 сконструирован подогреватель установки «Биогаз-301С». Он представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат со сферической крышкой и коническим днищем, оборудованный механической мешалкой и двумя теплообменными элементами. Один из них выполнен в виде наружной рубашки, а второй находится во внутренней полости подогревателя и состоит из вертикальных труб, соединенных в нижней и верхней частях кольцевыми коллекторами, через которые осуществляется вход и выход теплоносителя. Наличие двух теплообменных элементов в сочетании с мешалкой обеспечивает равномерный нагрев сырья. Объем подогревателя равен половине дозы суточной загрузки метантенка. Такое техническое решение позволяет проводить процесс метанового сбраживания в двухстадийном режиме.

В системах подогрева исходного сырья в качестве теплоносителя могут также использоваться пар или дымовые газы.

В Латвии на биогазовой установке совхоза «Огре» был опробован способ подогрева исходного сырья дымовыми газами, полученными при сжигания биогаза (рис. 2.10–I). Система нагрева работает следующим образом.

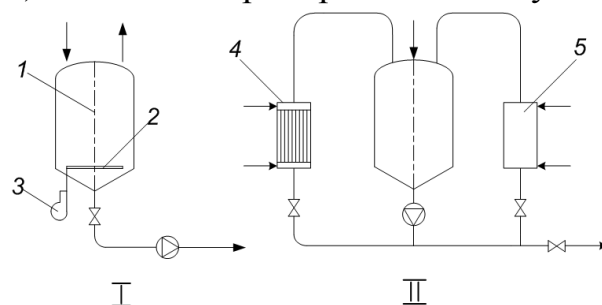


Рисунок 2.10 – Подогрев исходного сырья дымовыми газами: 1 – сборник; 2 – барботер; 3 – вакуумный насос; 4 – теплообменник водяной; 5 – рекуператор тепла

Сборник *1* загружается исходным сырьем, включается вакуумный насос *3*, который подает дымовые газы от топки котла в барботажное устройство сборника. Газы, проходя через слой сырья, отдают ему свое тепло и выходят из аппарата; одновременно происходит перемешивание массы. Подогретое до температуры сбраживания исходное сырье передается в биореактор. Такой метод непосредственного нагрева стоков горючими топочными газами достаточно эффективен, но приводит к увеличению количества аммиачного азота в нагреваемой массе за счет примесей оксидов азота в топочных газах; соответственно в сырье изменяется соотношение $C : N$, что отрицательно влияет на процесс сбраживания в метантенке.

На установке «Биогаз 301 С» также был испытан способ подогрева исходного сырья с использованием продуктов горения биогаза (рис. 2.11).

Процесс подогрева по разработанной схеме осуществляется в следующей последовательности. При заполненном подогревателе *1* сырье насосом *6* подается в донный штуцер газового нагревателя *2*. В нем нагреваемая масса поднимается до уровня бокового переливного патрубка и самотеком стекает обратно в подогреватель *1*.

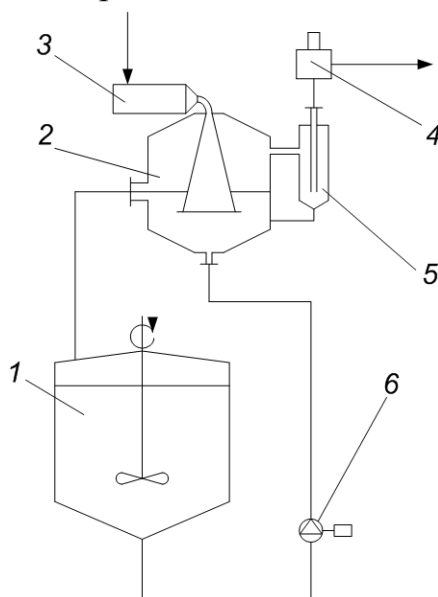


Рисунок 2.11 – Схема подогрева исходного сырья дымовыми газами на установке Биогаз 301 С: *1* – подогреватель-выдерживатель; *2* – газовый нагреватель; *3* – газовая горелка; *4* – газодувка; *5* – сепаратор; *6* – насос

В газовую горелку *3* нагревателя подается биогаз. Образовавшиеся продукты горения проходят через центральную трубу газового нагревателя

и отдают свое тепло подогреваемому сырью. Выброс охлажденных газов осуществляется газодувкой 4. Циркуляция сырья по схеме «подогреватель – выдерживатель – газовый нагреватель», а также его перемешивание в подогревателе-выдерживателе с помощью механической мешалки значительно интенсифицируют процесс нагрева стоков.

Как показала эксплуатация установки, рассмотренный способ подогрева сырья эффективен с точки зрения теплообмена между газом и жидкостью. Однако он недостаточно изучен с точки зрения воздействия дымовых газов на микрофлору, органические компоненты навоза и общего влияния на процесс метаногенеза в метантенке, поэтому подогрев сырья топочными газами на установке «Биогаз 301 С» производился только в период запуска.

Венгерская фирма «Конструмекс» разработала схему (рис. 2.10–II), позволяющую подогревать сырье не только за счет тепла дымовых газов, но и за счет тепла отферментированной биомассы. Чтобы исключить непосредственный контакт подогреваемого сырья с топочными газами, была разработана специальная конструкция рекуператора, представленная на рис. 2.12.

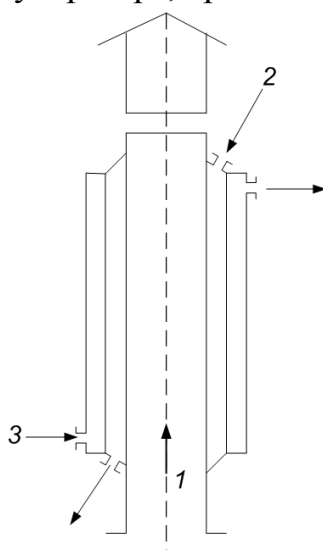


Рисунок 2.12 – Схема устройства для рекуперации тепла топочных газов и тепла отферментированной массы: 1 – движение горячих топочных газов; 2 – движение исходного сырья в метантенк; 3 – движение отферментированной массы из метантенка

Заслуживает внимания способ подогрева исходного сырья острым паром. Результаты испытаний на установке «Биогаз 301 С» показывают, что

нагрев острым паром можно осуществлять по схеме, аналогичной показанной на рис. 2.10–I; при этом длительность нагрева сокращается в несколько раз. К преимуществам метода можно отнести равномерность прогрева жидкости, так как конденсация пара происходит при постоянной температуре. Однако при этом следует учитывать, что образующийся конденсат разбавляет среду и увеличивает влажность исходного сырья. Кроме того, ввод острого пара в аппарат приводит к распаду термолабильных компонентов субстрата, изменяя таким образом его состав, а также наносит тепловой удар по микроорганизмам в зоне введения, что приводит к их гибели. Последнее обстоятельство при необходимости может использоваться для уничтожения патогенной микрофлоры и, соответственно, стерилизации исходного сырья.

2.1.2.4. Расчет оборудования для подготовки исходного сырья

Объем сборника для подготовки исходного сырья определяется в зависимости от величины дозы разовой загрузки:

$$V_1 = 1,25 \ddot{A}_\delta, \quad (2.7)$$

где V_1 – объем сборника подготовки исходного сырья, м³; 1,25 – коэффициент запаса объема; \ddot{A}_δ – доза разовой загрузки метантенка, м³; определяется по формуле (2.1).

Поверхность теплообмена нагревательного элемента, используемого для подогрева исходного сырья в сборнике его подготовки, определяется по уравнению теплопередачи [12]:

$$F_1 = \frac{Q_1}{(t_k - t_i) \cdot K \cdot \tau}, \quad (2.8)$$

где K – коэффициент теплопередачи (Вт/м² К); его величина зависит от ряда параметров, таких как род жидкости; характер течения жидкости (вынужденное или свободное); форма теплообменной стенки (длина, диаметр); состояние и свойства жидкости (температура, давление); параметры движения (скорость); температура теплопередающей стенки;

t_k – конечная температура нагрева сырья;

t_i – начальная температура сырья;

τ – продолжительность нагрева, с

Значение K для предварительных расчетов принимается из опытных данных для конкретного типа теплообменника. Для кожухотрубча того

теплообменника K может составлять 110 – 190 Вт/м² К

Q_1 – количество тепла, необходимое для нагрева дозы суточной загрузки сырья, Дж; определяется по уравнению теплопередачи для плоской стенки при постоянных температурах теплоносителей [12] в зависимости от количества нагреваемого сырья, времени нагрева, разности начальной и конечной температур и теплоемкости продукта.

Производительность отделителя крупных включений (ловушки) P_1 зависит от величины дозы разовой загрузки и времени загрузки:

$$D_1 = \frac{\ddot{A}_D}{\tau_1} \quad (2.9)$$

где τ_1 – продолжительность загрузки исходного сырья в сборник подготовки, ч.

Производительность измельчителя P_2 определяется по соотношению

$$D_2 = \frac{\ddot{A}_D}{\tau_2}, \quad (2.10)$$

где τ_2 – время измельчения исходного сырья, ч.

Как правило, время измельчения τ_2 принимается равным времени τ_1 .

2.2. Установки метанового сбраживания органических отходов.

Основные узлы и системы

Для переработки органического субстрата в биогаз разработаны различные технологические системы, основными из которых являются:

- периодическая (с попеременным использованием метантенков);
- непрерывная (проточная);
- ступенчатая (двухстадийная).

В проточной системе (при непрерывном или квазинепрерывном процессе) субстрат загружается в метантенк непрерывно либо через определенные промежутки времени, с удалением при этом соответствующего объема сброженной массы. Такой процесс называют еще отъемно-доливным.

При условии обеспечения стабильного технологического режима сбраживания (подача равных доз субстрата с одинаковыми характеристиками, поддержание оптимальной температуры брожения) можно достичь максимального для данных условий выхода биогаза и его равномерного

выделения. Для обеспечения непрерывности процесса в метантенках предусматриваются системы перепуска сбраживаемой массы, посредством которых поддерживается постоянный уровень субстрата внутри метантенка. Успешная работа непрерывных систем обеспечивается также за счет подачи в метантенк предварительно подогретого до оптимальной температуры и возможно более плотного, но не потерявшего текучести (влажность 89–90 %) субстрата и его эффективного перемешивания. В подобных технологических схемах используются метантенки с высокими дозами загрузки (от 16 до 20 % объема метантенка) [13].

В системе периодического сбраживания используют два или более метантенков, расположенных в схеме таким образом, что когда в одном из них идет сбраживание, другой находится под загрузкой или в стадии разгрузки. В этом случае метантенки опорожняются на 70–80 % их рабочего объема, а оставшаяся масса является затравочным (инокулирующим) материалом, содержащим необходимую для сбраживания микрофлору.

Коэффициент использования метантенков и производительность системы в периодическом режиме сбраживания ниже, чем в проточном за счет потерь времени на загрузку, выгрузку, восстановление оптимального режима. В связи с этим требуемый рабочий объем метантенков для систем периодического действия примерно вдвое больше, чем для проточных систем при всех прочих равных условиях. Однако системы, работающие в периодическом режиме, обладают и рядом преимуществ. Одним из них является то обстоятельство, что в метантенках таких систем не происходит проскок свежей массы отходов в зону выгрузки, поскольку в отличие от проточных систем в биореактор периодического действия на протяжении всего периода сбраживания не догружают свежее сырье, и сброженная масса является гарантированно обеззараженной.

Периодическую систему нельзя использовать без достаточного запаса биогаза, поэтому в ней обязательно должен быть предусмотрен газгольдер. Биогаз необходим для заполнения объема реактора, освобождающегося при выгрузке субстрата. В противном случае в рабочий объем метантенка проникнет воздух, что отрицательно скажется на жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов и безопасности эксплуатации установки.

Выделение биогаза при периодическом режиме происходит неравно-

мерно, что также является недостатком подобных схем. Если соединить параллельно несколько метантенков, работающих в периодическом режиме, то газовыделение системы в целом будет стабильным и почти равномерным (при условии одинакового интервала времени между загрузками метантенков). К примеру, для десятикамерной установки колебания между максимальным и минимальным выделением газа составляют 1–1,5 % [14].

Подобные схемы на практике применяются на небольших установках с числом метантенков от двух до четырех.

В периодическом режиме сбраживания работает также система с накоплением газа и шлама, имеющая только один реактор. Этот реактор является и бродильной камерой, и накопителем сброженной массы (шлама) до момента вывоза на поля.

Схематически принцип проточной и периодической технологии представлен на рис. 2.13, 2.14.

В проточном (отъемно-доливном) процессе сбраживания при выгрузке из метантенка части сброженного субстрата, равной дозе разовой загрузки, одновременно в метантенк подается эквивалентное количество исходного сырья. Количество циклов «загрузка-выгрузка» подбирается для каждого конкретного случая сбраживания.

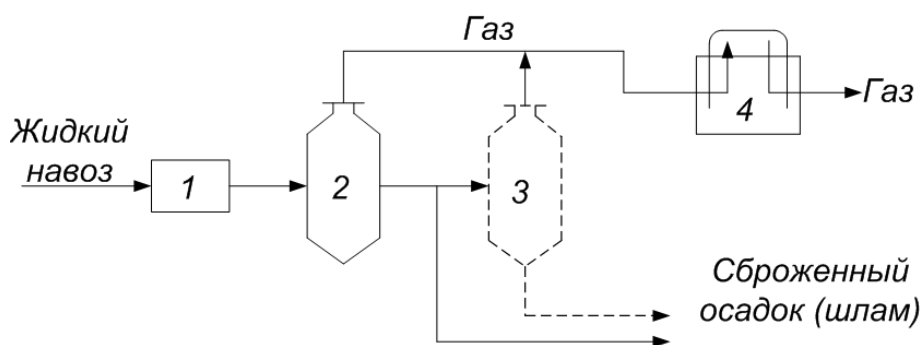


Рисунок 2.13 – Принципиальная схема проточной технологии анаэробного сбраживания: 1 – теплообменник; 2, 3 – метантенки; 4-газгольдер

При изучении закономерностей газообразования в различных системах сбраживания было установлено, что для периодического сбраживания основным фактором интенсификации процесса является температура, а для проточной системы – регулирование дозы загрузки [13].

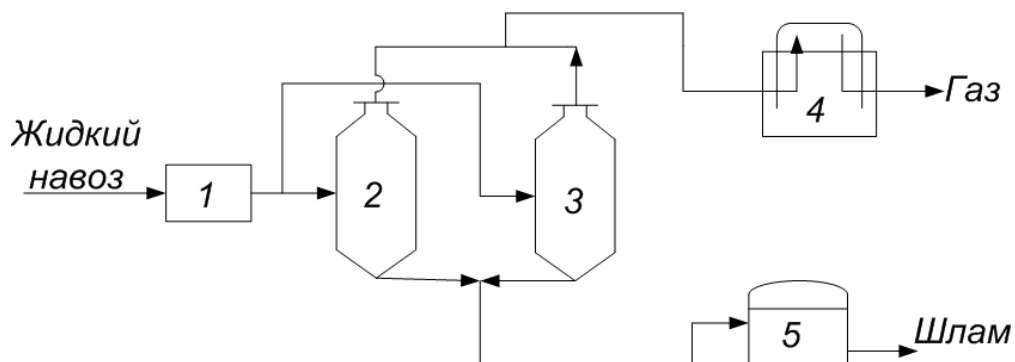


Рисунок – 2.14 Принципиальная схема технологии периодического анаэробного сбраживания: 1 – теплообменник; 2, 3 – метантенки; 4 – газгольдер; 5 – шламонакопитель

Метановое сбраживание – наиболее медленный из известных анаэробных процессов. Неравномерное поступление субстрата в метантенк приводит к более значительному понижению активности микроорганизмов, чем в других анаэробных процессах; в этой связи периодический режим сбраживания можно считать малоэффективным. По мнению авторов [15, 16], существенно интенсифицировать процесс метанового сбраживания можно только при проведении его в непрерывном режиме.

При непрерывном прохождении субстрата через бродильный аппарат из него вместе со сброженной массой выносятся часть микрофлоры, и концентрация бактерий (масса клеток в 1 мл) зависит от скорости разбавления микробной культуры свежим субстратом, т.е. от дозы загрузки. Основным условием устойчивости процесса непрерывного сбраживания является соответствие между скоростью протока среды в аппарате и скоростью роста клеток. На практике метановое брожение обычно рекомендуется вести при несколько заниженной скорости протока среды по сравнению с удельной скоростью роста клеток.

Одним из методов повышения концентрации метановых бактерий в метантенке является метод частичного возврата отферментированной массы (осадка) в линию загрузки свежего сырья, который реализуется по схеме, представленной на рис. 2.15. Отферментированная масса из метантенка через переливное устройство выгружается в отстойник 2. После отстоя осветленная часть сброженной массы отводится для использования, а осадок, смешанный со свежим сырьем, загружается в метантенк. Исследования

латвийских специалистов [17] показали, что при возврате в метантенк 10 % густого осадка влажностью 82–90 % выход биогаза увеличивается на 28 % по сравнению с переработкой сырья без добавления переброженного осадка.

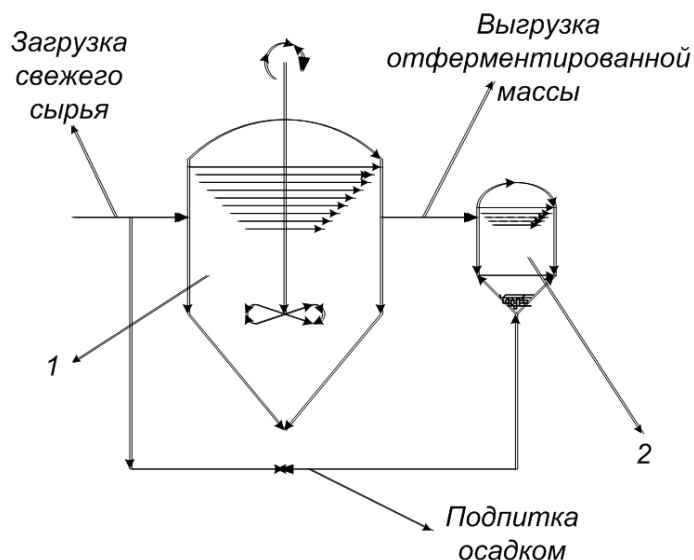


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема технологии метанового сбраживания с частичным возвратом осадка: 1 – метантенк; 2 – отстойник

Недостатком этого метода является то, что в метантенке со временем накапливается значительное количество осадка; это усложняет транспортирование сброженного субстрата.

Особый интерес представляет процесс сбраживания в метантенках с прикрепленной микрофлорой. Наиболее просты в конструктивном отношении реакторы со стационарными биопленками (анаэробные биофильтры). В них бактерии прикрепляются к пластинам, равномерно расположенным в объеме метантенка. Свежее сырье подается в верхнюю часть метантенка и, спускаясь вниз под действием сил гравитации, контактирует с бактериями биопленки. Толщина слоя пленки на вертикальных участках пластин составляет около 1 мм; на горизонтальных достигает 5 мм, что объясняется высокой склонностью обрабатываемого сырья к образованию осадка. В таких метантенках целесообразно производить перемешивание бродящей массы путем перекачивания ее насосом со дна в верхнюю зону реактора. Это способствует повышению концентрации активной биомассы на поверхности пластин [18, 19].

Как известно, биохимические превращения субстрата по схеме, пред-

ложенной А. Баркером, проходят в две фазы. Первая фаза – гидролизно-кислотное брожение, вторая – щелочное или метановое брожение. При этом кислотообразующие микроорганизмы имеют более высокую скорость роста, чем метанообразующие, поэтому общую скорость сбраживания субстрата лимитирует процесс метанообразования.

В соответствии с этим механизмом разработаны технологические схемы, в которых предусмотрено первую фазу брожения осуществлять в отдельном метантенке с последующей передачей субстрата в другой метантенк для прохождения второй фазы. Принципиальная схема такой установки показана на рис. 2.16.

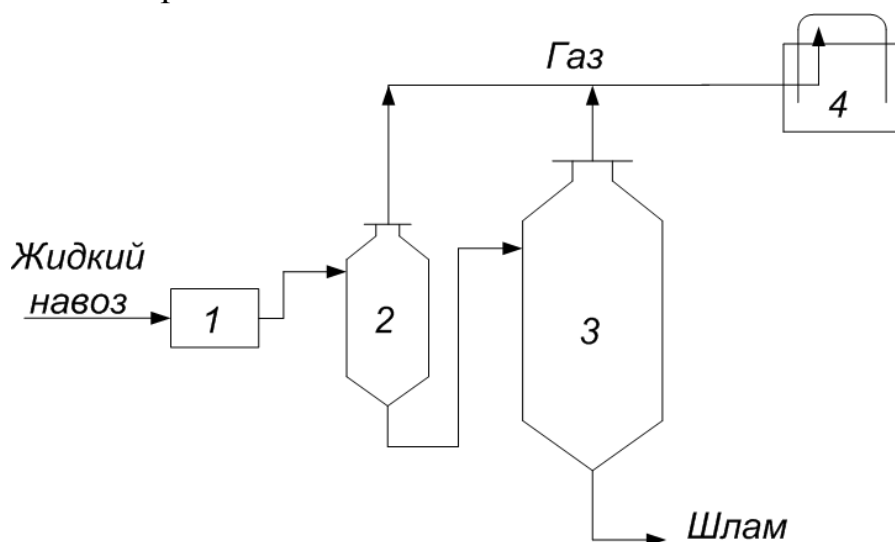


Рисунок 2.16 – Принципиальная схема технологии ступенчатого сбраживания: 1 – теплообменник; 2 – метантенк 1-й ступени (кислое брожение); 3 – метантенк 2-й ступени (щелочное или метановое брожение); 4 – газгольдер

С учетом того, что скорость гидролизно-кислотного брожения существенно выше скорости метанового сбраживания, были разработаны системы, в которых функции теплообменника 1 и метантенка 2 совмещены. Примером являются первые украинские промышленные установки «КОБОС-1» [6] и «Биогаз 301 С» [9].

По мнению некоторых специалистов, ступенчатое сбраживание целесообразно применять в реакторах с мезофильным режимом. В этом случае метантенк первой ступени может работать с высокими дозами загрузки (16–20 %). Ступенчатое сбраживание в термофильном режиме нерационально с экономической и технологической точек зрения [13].

Компромиссную точку зрения высказали ученые Института биологической технологии Франэнгоферского общества (Германия) [20]. Они установили, что процесс двухступенчатого сбраживания целесообразно вести при смешанном температурном режиме: на одной ступени – в термофильном, на другой – в мезофильном. В этом случае удастся оптимизировать процессы отдельных стадий – гидролиза и метанообразования – по всем основным параметрам технологического режима (водородный показатель, температура, давление, перемешивание).

2.2.1. Метантенк и его элементы

Метантенк представляет собой резервуар для сбраживания жидких органических субстратов. В настоящее время известны метантенки различных конструкций – яйцеобразная, цилиндрическая вертикальная, цилиндрическая горизонтальная и их модификации. Наибольшее распространение получили цилиндрические вертикальные камеры, которые различаются по форме крышек и днищ. В качестве верхней крышки могут использоваться днища плоские, сферические, полушаровые и конические. При выборе формы крышки следует учитывать:

- необходимость установки в газовой полости метантенка внутренних устройств (сепаратор биогаза, пеногаситель, устройство для разрушения корки);
- необходимость обеспечить эффективную коррозионную защиту внутренней поверхности крышки.

На практике для вертикальных цилиндрических метантенков отношение диаметра аппарата к высоте обечайки принимают, как правило, равным $1/1,2 \div 2$. Это соотношение является эмпирическим. Для более точного конструктивного расчета метантенков необходимо иметь данные об оптимальных соотношениях диаметра аппарата и высоты залива жидкости в метантенке, а также площади поперечного сечения цилиндрического корпуса и его высоты. В настоящее время в литературе такая информация отсутствует.

Форма нижнего днища может быть такой же, как форма крышки; при этом конструкция днища должна обеспечивать устойчивость и достаточ-

ную жесткость, а также препятствовать образованию застойных зон в нижней части метантенка, где может накапливаться осадок.

Для метантенков непрерывного или отъемно-доливного действия предпочтительно применение нижнего днища, имеющего уклон в сторону выгрузного патрубка. Преимущество таких днищ перед коническими (конусность 90°) в том, что при эксплуатации метантенков с коническим днищем в течение 2–3-х лет патрубков выгрузки обрастает осадком такой плотности, что его удаление возможно только механическим способом (рис. 2.17).

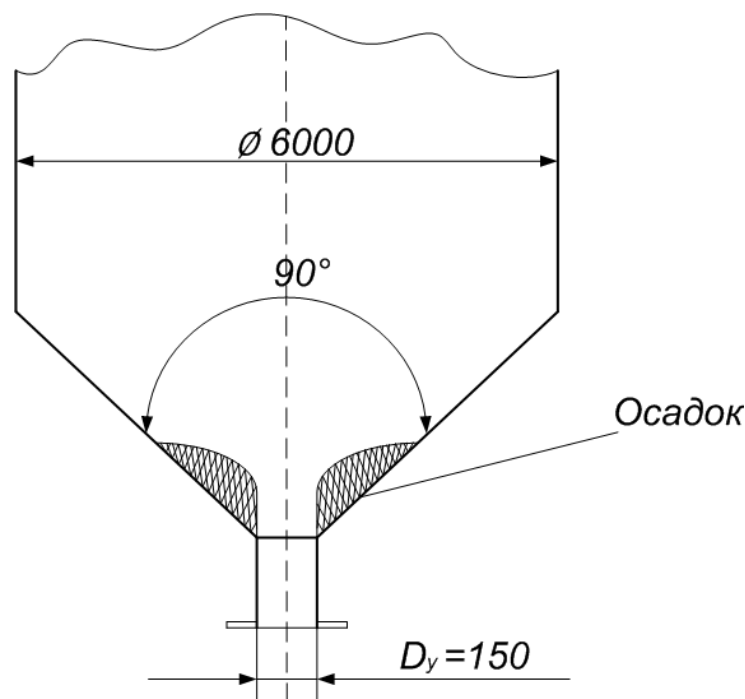


Рисунок 2.17 – Выходной штуцер вертикального метантенка с коническим днищем

Горизонтальные цилиндрические метантенки используются, как правило, в установках небольшой мощности.

При изготовлении метантенков из металла вертикальные метантенки имеют преимущества перед горизонтальными, так как затраты металла в расчете на 1 м^3 вертикального метантенка значительно ниже, чем на единицу объема горизонтального метантенка.

Вертикальное исполнение метантенка позволяет расширить его рабочее пространство. В практике используются метантенки однополостные и двух- трехполостные. Использование последних позволяет не только сбраживать, но и обеззараживать стоки.

От конструкции метантенка и его рабочих органов в значительной степени зависит эффективность процесса метанового сбраживания. Устройство биореактора должно обеспечивать поддержание стабильного технологического режима и благоприятные условия жизнедеятельности микроорганизмов; при этом аппарат должен иметь:

- хорошую теплоизоляцию;
- высокую коррозионную стойкость;
- прочность и герметичность;
- быть удобным в обслуживании.

Важными элементами конструкции метантенка являются теплообменники, предназначенные для поддержания стабильной температуры брожения и компенсации теплопотерь. Теплообменники могут быть:

- встроены в стенку камеры;
- располагаться в ее нижней части;
- встроены по периметру в форме змеевика [6, 12, 20].

Каждый из них в отдельности производит лишь локальный нагрев смеси, не обеспечивая равномерного температурного поля во всем объеме биореактора. Оптимальным решением является компоновка в одном метантенке различных типов теплообменных устройств, которые в сочетании с перемешиванием сбраживаемой массы обеспечат равномерный прогрев всего содержимого реактора. В то же время следует отметить, что расположение нескольких теплообменных устройств внутри реактора ухудшает условия перемешивания и массообмена в метантенке. Кроме того, наличие патрубков для ввода и вывода теплоносителя на днище или стенках корпуса аппарата нарушает его герметичность.

Технологические требования к скорости подвода тепла к сбраживаемой массе очень жесткие из-за узкого температурного оптимума процесса брожения, который укладывается обычно в интервал 1,5–2 °С. Это позволяет:

- создавать в биореакторе развитую поверхность теплообмена;

– постоянно бороться со шламообразованием и обрастанием отложениями поверхности теплообменных устройств.

Последнее достигается за счет увеличения скорости движения жидкостей у обеих (внутренней и наружной) поверхностей теплообменника, а также за счет поддержания температуры теплоносителя – горячей воды – не выше 60–70° С, поскольку увеличение температуры повышает опасность налипания взвешенных веществ субстрата на поверхность теплообмена.

Многие недостатки, присущие встроенным теплообменникам, могут быть устранены при использовании для подогрева субстрата выносных теплообменников различных конструкций (кожухотрубчатые, «труба в трубе», спиральные). В связи с тем, что в них поддерживается высокая скорость перемещения субстрата, осаждения взвешенных частиц на поверхности теплообмена не происходит. Кроме того, расположение теплообменников вне биореактора облегчает их ремонт и обслуживание.

Перемешивание субстрата в метантенке является одним из важнейших условий эффективного сбраживания. Оно может осуществляться с помощью механических, гидравлических и пневматических устройств.

Для механического перемешивания применяются различные мешалки – пропеллерные, лопастные, турбинные. Для вязких жидкостей такого рода устройства можно применять лишь в камерах не более 100 м³; в противном случае резко возрастает удельный расход энергии, снижается эффективность перемешивания. В метантенках небольшого объема (5–10 м³) можно применять механические мешалки с ручным приводом [20].

Гидравлическое перемешивание может быть применено как для крупных метантенков, так и для метантенков небольшой вместимости. Для перемешивания бродящей массы в метантенках объемом меньше 500 м³ используют центробежные насосы; в этом случае массу забирают из конусного днища и подают по загрузочной трубе в верхнюю зону метантенка [21]. Высокая эффективность гидравлического перемешивания достигается при использовании вращающегося сопла, через которое струи жидкости разбрызгиваются по всему объему камеры [14, 20]. Однако применение таких устройств значительно усложняет конструкцию метантенка. Гидравлические системы с неподвижным соплом должны строго соответствовать

форме и размерам реактора, чтобы обеспечивать необходимое направление струи жидкости и хорошее перемешивание.

Весьма эффективно перемешивание содержимого реактора с помощью продукционного биогаза [14, 20]. Однако этот метод требует большого расхода энергии на компремирование газа. Кроме того, за счет интенсивной флотации взвешенных частиц пузырьками биогаза происходит активное образование плавающей корки на поверхности сбрасываемой массы.

Образование корки – неизбежный результат процесса брожения, причем вначале она формируется в виде небольших локальных пятен и не мешает нормальному газовыделению. Однако при длительной эксплуатации происходит ее уплотнение, что затрудняет выделение образующегося биогаза и приводит к затуханию процесса метангенерации. Для предотвращения этих негативных явлений необходимо регулярно разрушать образующуюся корку. Наиболее экономичным и эффективным является механическое разрушение с помощью специальных устройств.

Анализ проектных решений, принятых при проектировании многих известных биогазовых установок, позволяет сформулировать основные требования к типовой конструкции метантенка:

- обеспечить равномерное перемешивание сбрасываемой массы при невысокой (не $> 0,5$ м/с) скорости перемещения слоев субстрата;
- создать в биореакторе равномерное температурное поле, используя комбинацию различных типов теплообменников;
- предусмотреть в конструкции специальное устройство, предотвращающее образование корки и засорение выгрузного патрубка.

Эти требования были учтены при разработке метантенка для установки «Биогаз – 301С». Аппарат был оборудован винтовой мешалкой, установленной в циркуляционной трубе, теплообменниками в виде наружного змеевика и трех U-образных внутренних погружных теплообменников, расположенных под углом 45° к вертикальной оси, устройством для корко-разрушения. Последнее выполнено в виде конусов и гребенки, представляющей собой ряд вертикальных прутков, установленных с зазором друг относительно друга. Гребенка является продолжением горловины. Конструкция аппарата представлена на рис. 2.18.

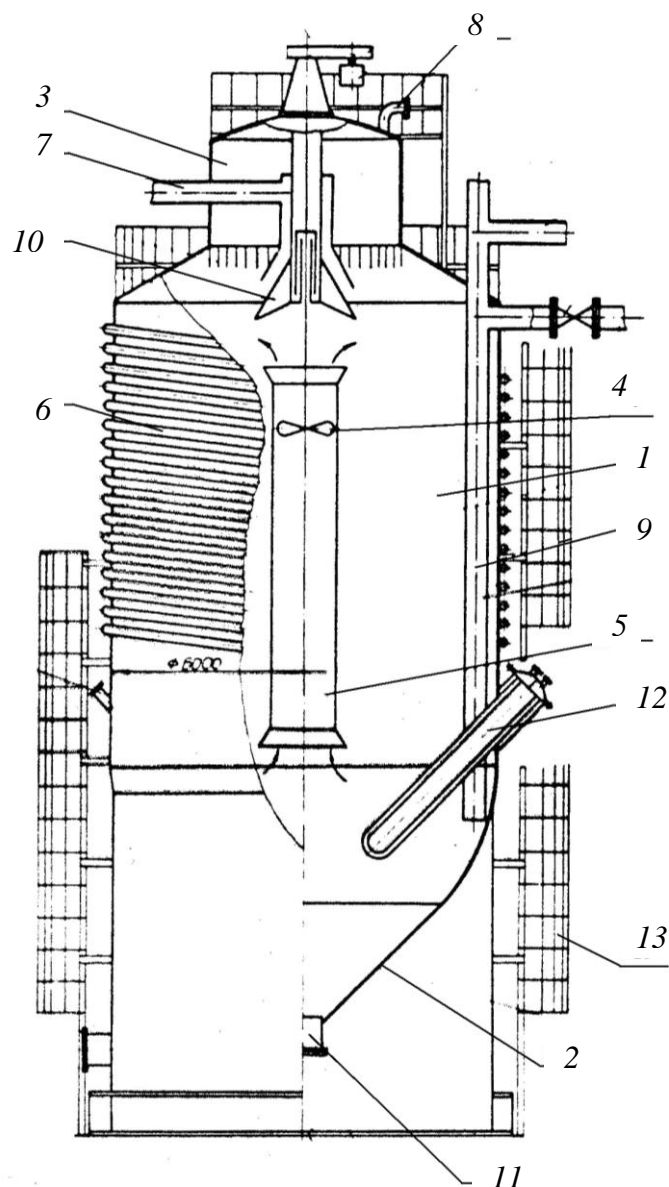


Рисунок 2.18 – Конструкция метантенка: 1 – корпус; 2 – коническое днище; 3 – горловина; 4 – пропеллерная мешалка; 5 – циркуляционная труба; 6 – змеевиковый теплообменник; 7 – загрузочный патрубок; 8 – патрубок для отвода биогаза; 9 – труба выгрузки сброженной массы; 10 – устройство для коркоразрушения; 11 – сливной патрубок; 12 – погружной теплообменник; 13 – теплоизоляция

2.2.2. Конструктивный и технологический расчет метантенка

Основным конструктивным параметром метантенка является его объем (V_m), который состоит из двух частей: реакционной (V_p), заполненной бродящей массой, и газовой (V_r):

$$V_m = V_p + V_r. \quad (2.11)$$

Объем реакционной части V_p определяется в зависимости от производительности установки по исходному сырью (B_n , м³/сут.) и времени пребывания сброживаемого сырья в метантенке (τ , сут.):

$$V_p = B_n \tau. \quad (2.12)$$

Время пребывания (или время экспозиции) сырья в метантенке прямо влияет на объем реактора, а следовательно, на капитальные затраты. С другой стороны, от продолжительности сброживания зависит количество продуцируемого биогаза и качество получаемых удобрений, поэтому при выборе оптимального времени сброживания необходимо учитывать противоречивое влияние всех этих факторов.

Известно, что выход биогаза зависит от степени сброживания сухого органического вещества субстрата, определяемой по уравнению (1.7):

$$a = (0,92 ж + 0,62 у + 0,34 б) \cdot 100 \%,$$

где a – степень сброживания СОВ; $ж$, $у$, $б$ – содержание жиров, углеводов и белков, г на 1 г сухого органического вещества. Коэффициенты в формуле означают удельный выход газа (в литрах) в расчете на 1 г жиров, углеводов и белков, загружаемых в метантенк.

По данным [25], при температуре 35 °С бактерии, вызывающие брожение белков и углеводов, развиваются очень быстро. Другие бактерии, вызывающие брожение жирных кислот, растут медленно, и за время выдержки субстрата меньше, чем 5 суток жирные кислоты практически не сброживаются. При этом в соответствии с формулой (1.7) удельный выход биогаза из жиров (коэффициент 0,92) наибольший, а содержание метана в нем (68 %) практически такое же, как в газе, полученном при разложении белков (71%). Особенности сброживания отдельных компонентов СОВ сырья необходимо учитывать при расчете времени выдержки субстрата в метантенке; очевидно, что для рассматриваемых субстратов оно должно быть не меньше 5 суток.

Для определения влияния продолжительности сброживания на качество удобрений, полученных на установке «Биогаз 301С», контролировали санитарные показатели сброженной массы. Было показано, что при переработке свиного навоза в термофильном режиме ($t = 52\text{--}55$ °С) уничтожение патогенной микрофлоры, контролируемой по выживаемости бактерий

группы кишечной палочки, обеспечивается в течение 4–5 суток, а при работе в термотолерантном режиме ($t = 40\text{--}42\text{ }^{\circ}\text{C}$) – в течение 7–9 суток. Количество сапрофитной микрофлоры снижается при этом на 97,8 %. Очевидно, что в данном случае оптимальное время выдержки сырья в метантенке будет зависеть от температурного режима и конечной цели сбраживания – производство биогаза или обеззараженных удобрений.

Соотношение между объемом газовой полости метантенка и его реакционным объемом может колебаться в довольно широких пределах. Коэффициент заполнения метантенка обычно составляет 0,65 – 0,85, но объем газовой полости определяется не только степенью заполнения реактора, но и наличием или отсутствием газгольдера в составе биогазовой установки. Кроме того, в газовой полости могут располагаться устройства для коркоразрушения, переливные и распределительные устройства для загрузки сырья и соединения отдельных полостей метантенка между собой. Поэтому объем газовой полости определяется индивидуально для каждого конкретного случая проектирования установки.

Установки могут комплектоваться одним, двумя или несколькими метантенками. При определении количества метантенков следует учитывать:

- тип технологической схемы (периодическая, проточная, ступенчатая);
- производительность установки по перерабатываемому сырью;
- дозу разовой загрузки;
- условия изготовления, монтажа, безопасность эксплуатации;
- коэффициент использования рабочего пространства метантенка и оборудования всей установки.

Одним из основных показателей работы метантенка является выход биогаза и содержание в нем метана.

Выход биогаза (B_B) зависит от множества факторов, и его расчетная величина обычно не совпадает с практически получаемой, поскольку для производства максимального количества биогаза необходимо обеспечить максимальную степень распада органического вещества. Это может быть достигнуто при длительном сбраживании в метантенках больших объемов, что нецелесообразно с экономической точки зрения. Кроме того, высокая степень разложения органического вещества приводит к тому, что полу-

ченный при этом обезвоженный шлам обеднен органическим веществом и теряет свои удобрительные свойства. Поэтому в практических расчетах обычно принимают степень разложения сухого органического вещества не более 40 %. Количество биогаза следует принимать из расчета 1 г на 1г распавшегося беззольного вещества (COB), а плотность биогаза – 1 кг/м³

Значение B_B может быть определено по формуле

$$\hat{A}_a = \dot{I}_{\text{н.а.}} \cdot \dot{I}_a \quad (2.13)$$

где M_{COB} – масса сухого органического вещества в исходном сырье, т/сут;

M_b – выход биогаза, м³ на 1 кг загружаемого сухого органического вещества;

$$\dot{I}_{\text{н.а.}} = \frac{\hat{A}_t \cdot (100 - \gamma)}{100} - \dot{I}_{\text{з.с.}} \quad (2.14)$$

где B_n – производительность установки по исходному сырью, т/сут;

γ – влажность исходного сырья, % ;

$M_{\text{зл}}$ – масса золы в исходном сырье, т/сут.

Наиболее точно рассчитать выход биогаза можно в случае, если использовать значение величины M_b , определенное экспериментально для конкретного вида сырья. В иных случаях значение M_b можно принимать по табл. 2.9, 2.10, 2.11.

Количество товарного биогаза $B_{b.t.}$:

$$\hat{A}_{a.o} = \hat{A}_a - \hat{A}_o, \quad (2.15)$$

где B_t – расход биогаза на технологические нужды установки, м³/сут

Таблица 2.9 – Выход биогаза при метановом сбраживании сельскохозяйственных отходов

Органические отходы	Выход биогаза загружаемого COB, м ³ /кг	Содержание CH ₄ , %	Источник информации
1	2	3	4
Свиной навоз	0,580	77	[26]
	0,336	81	[20]
	0,520	62	[27]
	0,480	60	[28]
	0,358	62	[29]
	0,4–0,5	55÷75	[30]
	0,440	–	[31]
	0,320	–	[32]

Продолжение таблицы 2.9

1	2	3	4
Навоз КРС			
Коров	0,2–0,3	60	[33]
	0,404	65	[34]
	0,2–0,35	55–75	[35]
Бычков	0,290	57	[35]
	0,252	80	[20]
	0,25–0,37	48–58	[36]
Помет			
Кур	0,370	54	[37]
Индеек (взрослых)	0,640	62	[38]
Индеек (молодых)	0,390	57	[38]

Таблица 2.10 – Выход биогаза при смешении некоторых видов отходов

Отходы	Выход биогаза загружаемого СОВ, м ³ /кг	Источник информации
Навоз КРС + свиной навоз (1:1)	0,510 0,28–0,32*	[39] [40]
Навоз КРС + помет птиц (1:1)	0,528	[39]
Навоз КРС + сорняки (1:1)	0,363	[39]
Навоз КРС + свиной навоз (1:1)	0,320**	[17]
Свиной навоз + куриный помет (1:1)	0,634	[39]
Свиной навоз + куриный помет (1:1)	0,36–0,38*	[31]
Свиной навоз + куриный помет + навоз КРС (1:0,5:0,5)	0,585	[39]
Свиной навоз + куриный помет + навоз КРС (1:1:1)	0,333*	[31]
Свиной навоз + сорняки (1:1)	0,423	[17]
Куриный помет + сорняки	0,495**	[30]
Условия исследований: * – мезофильный режим, выдержка 10–15 суток; ** – суточная загрузка 20 %, выдержка 5 суток, температура 54 °С.		

Таблица 2.11 – Выход биогаза в зависимости от температуры и времени ферментации [17]

Температура процесса, °С	Время сбраживания, сут.	Выход СН ₄ , загруз. СОВ, л/кг	Температура процесса, °С	Время сбраживания, сут.	Выход СН ₄ , загруз. СОВ, л/кг
25	5	22,44	44	5	118,59
	10	54,40		10	269,95
	20	116,26		20	428,93
28	5	21,68	48	5	203,18
	10	91,73		10	308,12
	20	174,80		20	478,44
32	5	63,23	50	5	179,17
	10	161,12		10	285,13
	20	329,98		20	357,95
34	5	100,07	54	5	119,93
	10	202,17		10	302,34
	20	347,73		20	385,71
36	5	66,67	56	5	184,68
	10	167,90		10	375,88
	20	296,10		20	469,38
40	5	115,61	60	5	61,83
	10	265,10		10	74,72
	20	417,56		20	93,84

Примечания: 1. Исследования проводились на свином навозе в режиме однократной загрузки. 2. Содержание СН₄ в биогазе колебалось от 56 до 70 %.

Количество товарного тепла, которое можно получить из продукционного биогаза, определяется на основе теплового баланса, который в общем виде выражается уравнением

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (2.16)$$

где Q – количество тепла, которое можно получить из биогаза, получаемого в течение суток, МДж/сут.;

Q_1 – количество тепла, необходимое для подогрева исходного сырья, загружаемого в метантенк, до температуры сбраживания, МДж/сут.;

Q_2 – количество тепла, необходимое для компенсации тепловых потерь в метантенке, МДж/сут.;

Q_3 – количество тепла, эквивалентное потребляемой электрической энергии, МДж/сут.;

Q_4 – количество тепла, которое можно получить из товарного биогаза, МДж/сут.

$$Q = B_6 \cdot q, \quad (2.17)$$

здесь q – теплотворная способность биогаза, МДж/м³.

$$Q_1 = B_n \cdot C_p \cdot (t_k - t_n), \quad (2.18)$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкого навоза, МДж/кг;

t_k – температура нагретого навоза (температура ферментации), °С;

t_n – температура исходного навоза, °С.

$$Q_2 = B_n \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (2.19)$$

здесь Δt – допустимое понижение температуры ферментации для конкретного температурного режима, °С.

$$Q_3 = N \cdot q_1, \quad (2.20)$$

где N – расход электроэнергии, кВт/ч/сут.;

q_1 – количество тепла, эквивалентное 1 кВт/ч электроэнергии, МДж/кВт/ч

$$Q_4 = B_{6.т} \cdot q_1. \quad (2.21)$$

Поверхность теплообмена нагревательного элемента, используемого для поддержания температурного режима и компенсации теплопотерь, определяется по формуле, аналогичной формуле 2.8:

$$F_2 = \frac{Q_2}{(t_k - t_i) \cdot K \cdot \tau_4} \quad (2.22)$$

где τ_4 – время подогрева, необходимое для компенсации допустимого перепада температур.

Величина τ_4 должна соответствовать периоду времени, за который понижается температура на величину Δt . В этом случае поверхность теплообмена F_2 будет минимальной.

Пример расчета метантенка

Определить объем и количество метантенков, выход биогаза для установки, перерабатывающей отходы птицефабрики с содержанием 400–450 тыс. кур-несушек. Производительность по исходному сырью составляет 160 м³/сутки при влажности 90 %, зольности 17,3 %. Плотность стоков принять 1 т/м³.

Содержание сухого вещества ($M_{с.в.}$) в сырье составляет:

$$\dot{I}_{н.â} = \frac{\hat{A}_i \cdot (100 - \gamma)}{100} = \frac{160 \cdot 1 \cdot (100 - 90)}{100} = 16 \text{ т/сут.} = 16000 \text{ кг/сут.}$$

Количество сухого органического вещества ($M_{сов}$) составляет:

$$M_{сов} = M_{с.в.} - M_{зл} = 16000 - 0,173 \times 16000 = 13232 \text{ кг/сут.}$$

Количество распавшегося органического вещества, при степени сбраживания 40 %, составит:

$$0,4 \times 13232 = 5292,8 \text{ кг/сут.}$$

Используя экспериментальные данные по удельному выходу биогаза на единицу разложившегося органического вещества ($0,37 \text{ м}^3/\text{кг}$, табл. 2.9), можно определить общий выход биогаза:

$$B_B = 0,37 \text{ м}^3/\text{кг} \times 5292,8 \text{ кг} = 1958 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Для того чтобы определиться с основными технологическими характеристиками метантенка, необходимо оценить величину биологической нагрузки на метантенк (табл. 2.12). Этот показатель зависит от времени экспозиции сырья и характеризует способность микроорганизмов обеспечить необходимую степень разложения субстрата в данном режиме брожения. Для достижения степени разложения сырья в пределах 37–40 % биологическая нагрузка должна составлять 10–20 %

Таблица 2.12 – Величина биологической нагрузки на метантенк

Экспозиция, сут.	Объем метантенка, м^3	Биологическая нагрузка на метантенк, %
5	$160 \times 5 = 800$	$160 \times 100 : 800 = 20$
6	$160 \times 6 = 960$	$160 \times 100 : 960 = 16,6$
7	$160 \times 7 = 1120$	$160 \times 100 : 1120 = 14,2$
8	$160 \times 8 = 1280$	$160 \times 100 : 1280 = 12,5$
9	$160 \times 9 = 1440$	$160 \times 100 : 1440 = 11,1$
10	$160 \times 10 = 1600$	$160 \times 100 : 1600 = 10,0$
15	$160 \times 15 = 2400$	$160 \times 100 : 2400 = 6,6$
20	$160 \times 20 = 3200 \text{ м}^3$	$160 \times 100 : 3200 = 5 \%$

Время выдержки сырья в метантенке, равное 15–20 сут., соответствует мезофильному режиму сбраживания, 7–10 сут. – термотолерантному и

термофильному режимам; при этом обеззараживание стоков в термофильном режиме достигается за 5–7 сут., в термотолерантном режиме – за 7–9 сут. При выборе режима сбраживания следует учитывать, что удельные затраты тепла на поддержание термотолерантного режима существенно ниже, чем на поддержание термофильного режима.

С учетом изложенного принимаем время выдержки сырья в метантенке 7 сут., режим сбраживания – термотолерантный (40–42 °С); соответственно объем реакционной части метантенка составит 1120 м³. При этом биологическая нагрузка на метантенк составит 14,2 %.

При принятии решения о необходимом количестве метантенков следует учитывать следующее:

- для эффективного сбраживания необходимо обеспечить постоянную температуру бродящей массы и равномерное распределение субстрата по всему объему метантенка. Это достигается за счет хорошего перемешивания. Выбор способа перемешивания зависит от объема реакционной среды. Использование механических мешалок для больших (500 м³ и более) объемов реакторов малоэффективно; при гидравлическом перемешивании (перекачивании) больших объемов субстрата с помощью насосов конструкция метантенка усложняется за счет некоторых специальных внутренних устройств;

- эффективность газовыделения зависит от биологической нагрузки на метантенк и количества загрузок сырья, т.е. от дозы разовой загрузки. Известно, что наиболее эффективно процесс протекает при 2–3 загрузках в сутки через равные промежутки времени.

В связи с тем, что в реакторах небольшого объема проще, чем в крупных реакторах, обеспечить эффективное перемешивание бродящей массы, поддержание стабильной температуры, равномерную загрузку сырья в практике строительства больших биогазовых установок комплектование оборудования производят по модульному принципу в виде нескольких установок (модулей) с реакторами небольшого объема. Такая компоновка оборудования предпочтительна, несмотря на то, что суммарная металлоемкость модульных установок выше, чем установок с реакторами большой единичной мощности. Для модулей обычно используют метантенки объемом 300, 400, 500, 600, реже 800 м³. В рассматриваемом примере можно ис-

пользовать 2 метантенка по 600 м^3 или 3–4 метантенка меньшей емкости.

Руководствуясь изложенными соображениями, принимаем: количество метантенков – 3, объем одного метантенка 400 м^3 , количество загрузок в каждый метантенк – 2 за смену, всего 6 загрузок в сутки, доза разовой загрузки $160 : 6 = 26,6 \text{ м}^3$.

2.3. Системы сбора и подготовки биогаза к использованию

2.3.1. Состав и свойства биогаза

Биогаз – конечный продукт разложения микроорганизмами сложных органических веществ в анаэробных условиях; его качество определяется, в первую очередь, содержанием метана либо соотношением метана и диоксида углерода. Диоксид углерода разбавляет биогаз и приводит к потерям при его хранении, поэтому важно стремиться к высокому содержанию метана и как можно более низкому содержанию диоксида углерода. Достижимое обычно содержание метана колеблется между 50 и 75 % и зависит от источника получения биогаза. В биогазе, полученном из осадков коммунальных сточных вод, концентрация метана достаточно стабильна и колеблется в пределах 60–68 %, а в полученном из отходов животноводства – от 50 до 75 %. Важнейшей составляющей биогаза является сероводород (H_2S); он очень агрессивен и коррозионно опасен, что вызывает проблемы при использовании биогаза в горелках и двигателях. Кроме того, в биогазе содержатся следы аммиака, элементарного азота, водорода и кислорода общим содержанием от 6 до 8 %. Продукционный биогаз насыщен водяными парами, которые могут содержать также следы малоисследованных растворенных веществ, способных вызывать проблемы при сжигании биогаза в котлах и двигателях [20].

Количество и состав биогаза, образующегося в результате разложения органического вещества, зависит от соотношения углерод-водород-кислород в исходном материале и от технологического режима процесса брожения. В табл. 2.13 приведены данные литературы, а также результаты собственных исследований авторов по составу газов сельскохозяйственных биогазовых установок.

Таблица 2.13 – Состав биогаза, получаемого из отходов животноводства

Страна	Содержание компонентов							Источник информации
	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂	CO	H ₂ S	
Германия	59,8	36,0	1,98	0,2	–	–	0,02	[41]
Германия	62,5	34,8	1,0	0,8	–	0,9	0,3	[41]
Германия	55–75	25–45	0–3	0–1	0–1	–	0–1	[42]
Венгрия	55–70	27–44	–	–	1,0	–	3	[43]
Италия	56,8	37,8	4,86	0,53	0,01	–	–	[44]
США	20–80	15–16	0,5–1	–	–	–	до 1	[45]
Латвия	65	34	–	до 1	–	–	–	[46]
Украина, (установка БИОГАЗ- 301С)	56–65	15–21	1,8–4,4	0–0,2	–	2,4	–	[9]

Поскольку азот, кислород, водород, сероводород и другие примеси содержатся в биогазе в небольшом количестве, то теплотворная способность биогаза определяется соотношением основных двух компонентов – CH₄ и CO₂.

Зависимость теплоты сгорания биогаза от содержания CH₄ приведена на рис. 2.19 [20].

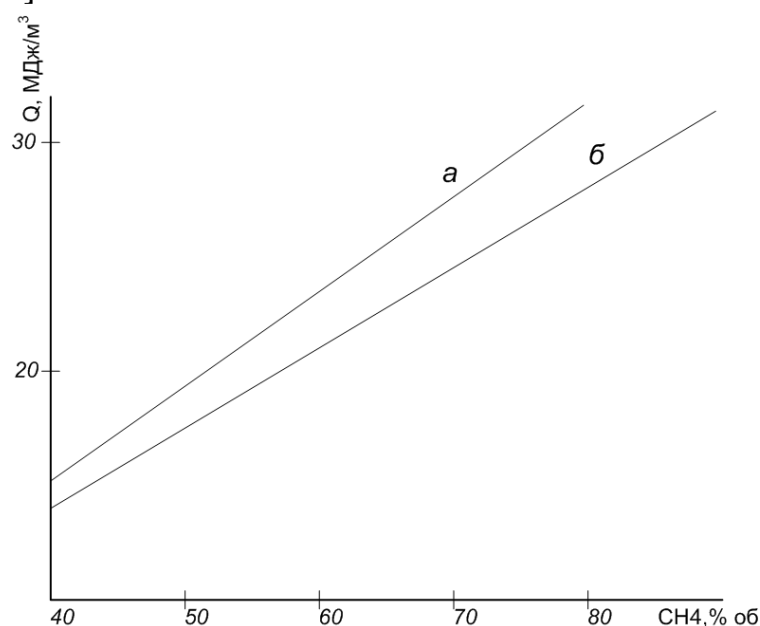


Рисунок 2.19 – Зависимость теплоты сгорания биогаза от содержания метана: *а* – высшая теплота сгорания; *б* – низшая теплота сгорания

На основании допущения, что газовая смесь в основном состоит из CH_4 и CO_2 , можно выразить зависимость плотности биогаза от содержания основных компонентов, обозначив через x – объемное содержание CO_2 в биогазе; соответственно $(1-x)$ – содержание CH_4 [47]:

- плотность при нормальных условиях ($t = 0^\circ\text{C}$; $p = 101,3 \text{ кПа}$), кг/м^3 :

$$\rho = 0,717 + 1,25 x;$$

- относительная плотность по воздуху: $d = 0,554 + 0,97 x$.

Зависимость нормальной и относительной плотности биогаза от содержания метана в нем показана на рис. 2.20 [47].

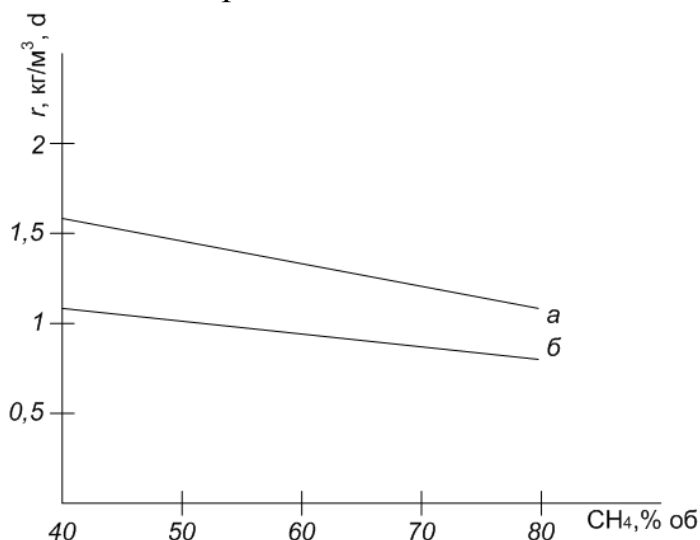
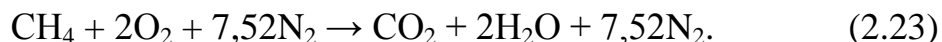


Рисунок 2.20 – Зависимость нормальной и относительной плотности биогаза от содержания метана: a – при нормальных условиях; (ρ); b – плотность относительно воздуха (d)

Горение биогаза в воздухе выражается стехиометрическим уравнением



На основе этого уравнения с учетом доли CO_2 в биогазе, определяется потребность в воздухе при сжигании, количество и состав продуктов горения. На рис. 2.21, 2.22 показано содержание CO_2 в сухих продуктах сгорания и зависимость расхода сухого воздуха на сжигание биогаза.

При расчете горелок большое значение имеет нормальная скорость распространения пламени. Зависимость ее от содержания CH_4 в биогазе показана на рис. 2.23.

Число Воббе (W_o), характеризующее взаимозаменяемость газов, равно отношению теплоты сгорания к квадратному корню из относительной плотности газа. С увеличением содержания CH_4 в биогазе число Воббе возрастает, что видно из рис. 2.24.

Низшая теплота сгорания биогаза, МДж/м³: $Q_H = 35,8 \cdot (1 - x)$.

Высшая теплота сгорания биогаза, МДж/м³: $Q_B = 39,8 \cdot (1 - x)$.

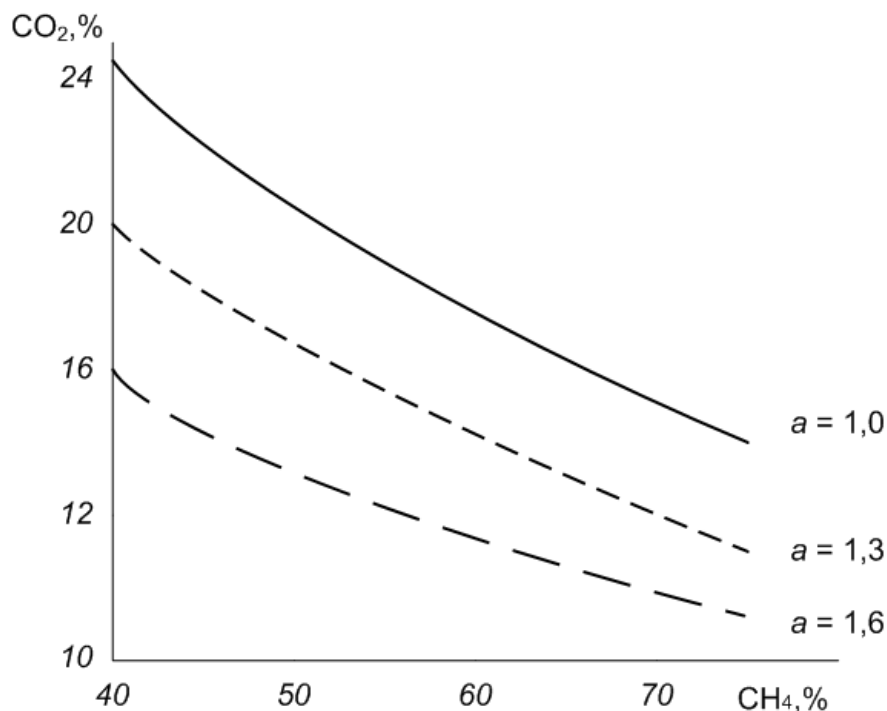


Рисунок 2.21 – Содержание CO_2 в сухих продуктах сгорания для газа, состоящего из смеси газа CH_4 и CO_2 с двухпроцентным содержанием N_2 при различных α по [49].

По данным [49] для биогаза состоящего из 60 % CH_4 и 40 % CO_2 , верхний предел воспламенения (I) составляет 18 %, а нижний (I_H) – 7,5 %; по другим данным [47, 48] пределы воспламенения могут колебаться в более широких пределах, как показано на графиках рис. 2.25.

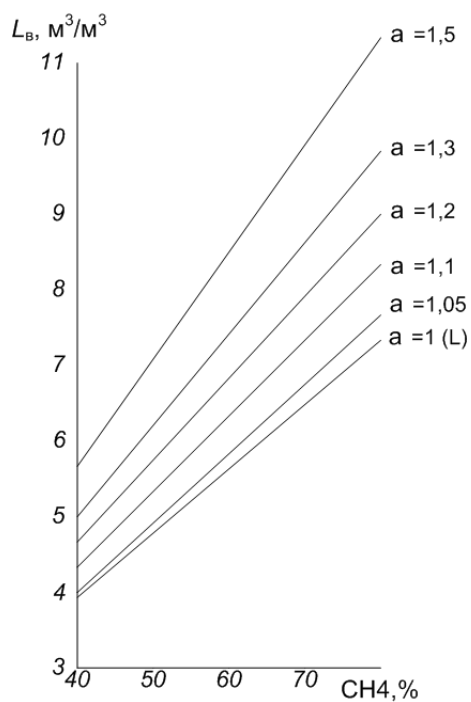


Рисунок 2.22 – Расход воздуха для сжигания биогаза при различных коэффициентах избытка воздуха α [47].

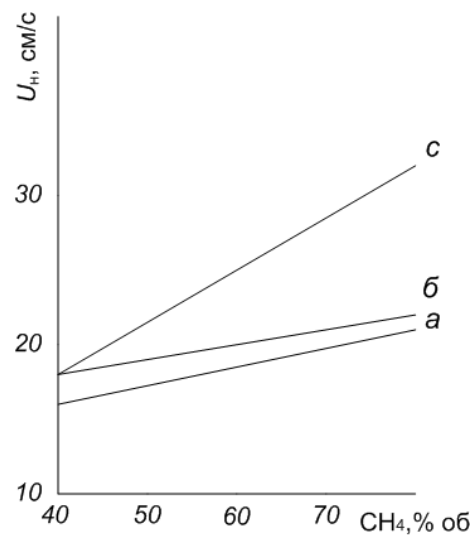


Рисунок 2.23 Нормальная скорость распространения пламени a – [47], b – [48], c – [49]

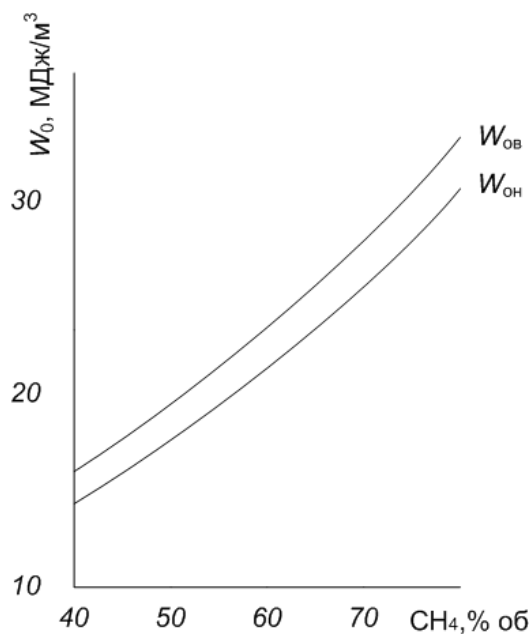


Рисунок 2.24 – Высшее $W_{об}$ и низшее $W_{он}$ значение числа Воббе для биогаза

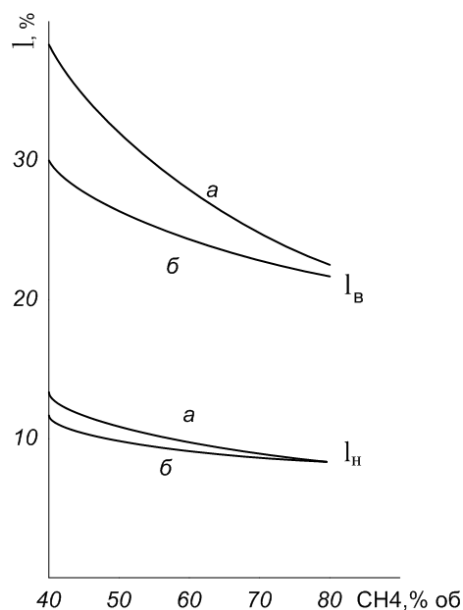


Рисунок 2.25 – Концентрационные пределы воспламенения биогаза:
a – [47]; *б* – [48].

Присутствие в биогазе других примесей, кроме CH_4 и CO_2 , незначительно изменяет основные свойства и характеристики горения. Например, содержание H_2 в количестве 2 % повышает скорость распространения пламени на 4–6 см/с, однако при этом снижается теплота сгорания [50].

В табл. 2.14 приведены усредненные данные по составу и свойствам биогаза [50]

Таблица 2.14 – Состав и свойства биогаза

Наименование показателя	Значение
Содержание метана, % об.	50–70
Плотность при нормальных условиях, кг/м^3	1,40–0,98
Относительная плотность по воздуху	1,05–0,75
Низшая теплота сгорания, МДж/м^3	18,0–27,5
Высшая теплота сгорания, МДж/м^3	20,0–31,5
Теоретический объем воздуха для горения, $\text{м}^3/\text{м}^3$	4,8–7,6
Содержание CO_2 в сухих продуктах сгорания, % об	21,0–14,3
Нормальная скорость распространения пламени, см/с	16–22
Число Воббе, МДж/м^3	
низшее	17,56–33,11
высшее	19,52–36,81
Концентрационные пределы воспламенения, %	
низший	10–6,5
высший	31–17

В биогазе, полученном при сбраживании свиного навоза на установке «Биогаз 301С» при температуре 40-41 °С содержание метана колебалось в пределах 56,1– 65,3 % , относительная плотность составляла 0,942, теплота сгорания – 5125 ккал/м³.

2.3.2. Очистка биогаза от примесей

Перед использованием биогаз подвергается очистке от примесей. Степень очистки зависит от способа использования газа (табл. 2.15) [51]. Имеются и другие данные о требованиях к очистке биогаза. Так, большое количество малых установок, работающих в Китае и Индии, не комплектуется устройствами для очистки от H₂S при использовании биогаза для бытовых нужд (газовые осветительные фонари, газовые плиты). Известны работы по использованию биогаза без очистки в двигателях внутреннего сгорания.

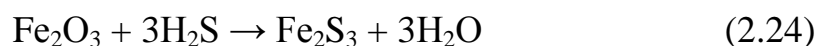
Таблица 2.15 – Требования к очистке биогаза

Способ использования биогаза	Необходимость очистки от примесей			
	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	взвешенных частиц
Бытовые газовые плиты	да	нет	нет	да
Горелки инфракрасного излучения	да	нет	нет	да
Отопительный котел (подготовка горячей воды)	желательна	нет	нет	да
Стационарные газовые двигатели	частично	нет	нет	да
Транспортные средства	да	да	да	да

Для удаления влаги, как правило, используются влагоотделители и конденсатосборные устройства.

Очистка биогаза от H₂S и CO₂ может осуществляться адсорбционным, абсорбционным или механическим (мембранным) способами.

Известен метод очистки биогаза от сероводорода [41], основанный на адсорбции H₂S при прохождении газа через емкости с гранулами оксида железа по реакции:



Регенерация гранул оксида железа осуществляется продувкой воздухом. Сульфид железа окисляется до Fe_2O_3 ; при этом образуется сера, которая откладывается на поверхности адсорбента:



Принципиальная схема очистки показана на рис. 2.26. Установка, состоящая из двух колонн (диаметр 0,4 м, высота 1,5 м), обеспечивает непрерывную очистку $60 \text{ м}^3/\text{сутки}$ биогаза. Когда в одной колонне идет процесс поглощения H_2S , другая продувается воздухом с целью регенерации адсорбента.

Используется технология сухой очистки биогаза с применением дробленых частиц гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Для очистки 100 м^3 биогаза с содержанием H_2S 0,35 % требуется около 2 кг $\text{Fe}(\text{OH})_3$. [43].

Регенерация отработанного влажного поглотителя осуществляется продувкой воздухом:



Наиболее простым и дешевым способом отделения CO_2 и частичного отделения H_2S является промывка биогаза водой, однако он требует большого расхода воды. Для удаления CO_2 из $0,2 \text{ м}^3$ биогаза при стандартных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$; $p = 101,3 \text{ кПа}$) расходуется приблизительно 96,1 л воды; при повышении давления снижается расход воды, но, вследствие поглощения большого количества CO_2 , возрастает ее кислотность до уровня, при котором она может вызывать коррозию оборудования.

Способ мембранного разделения основан на различной проницаемости компонентов биогаза через мембрану. Однако широкого распространения этот способ пока не получил и, по мнению некоторых исследователей [52], его целесообразно использовать на крупных установках с производительностью не менее $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ биогаза.

Институтом газа НАН Украины предложена технология очистки от CO_2 , осушки и компремирования биогаза, полученного на хранилищах бытовых отходов. На основе этой технологии Сумским ОАО «НПО им. М.В. Фрунзе» в 2001 г. изготовлен для США комплекс оборудования, схематично предоставленный на рис. 2.27. Комплекс состоит из 3-х компрессорных установок (2 – рабочие, 1 – резервная), установки очистки и блока осушки газа, насосного, сепарационного, емкостного и другого вспомогательного оборудования.

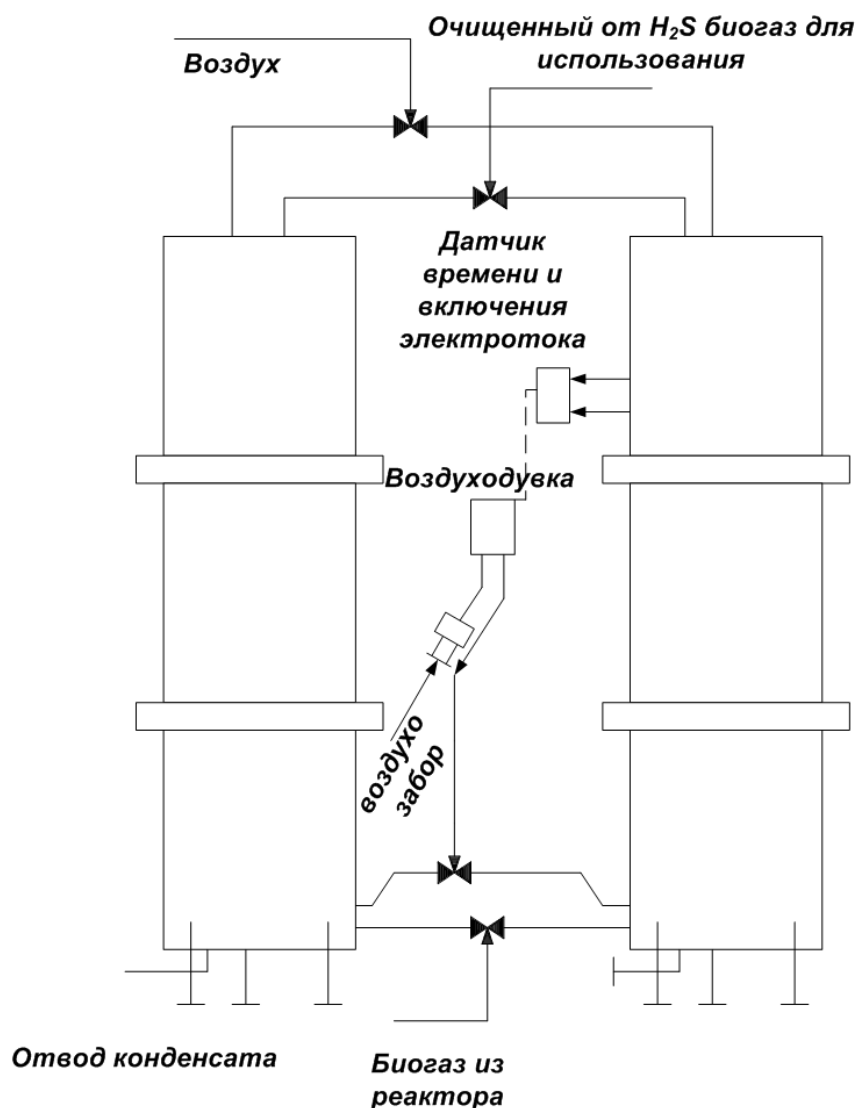


Рисунок 2.26 – Схема установки очистки биогаза от сероводорода методом адсорбции оксидом железа

Газодувки подают биогаз на вход комплекса через входной сепаратор *С1*, предназначенный для отделения твердых частиц и капельной жидкости перед подачей газа в блок компрессоров БК. Компримированный биогаз направляется в нижнюю часть абсорбционной колонны *А*. В верхнюю часть абсорбера *А* с помощью насосов, установленных в блоке *Н1*, подается абсорбент, который, стекая вниз по насадке, контактирует с поднимающимся вверх газом, поглощая из него диоксид углерода и некоторые другие компоненты.

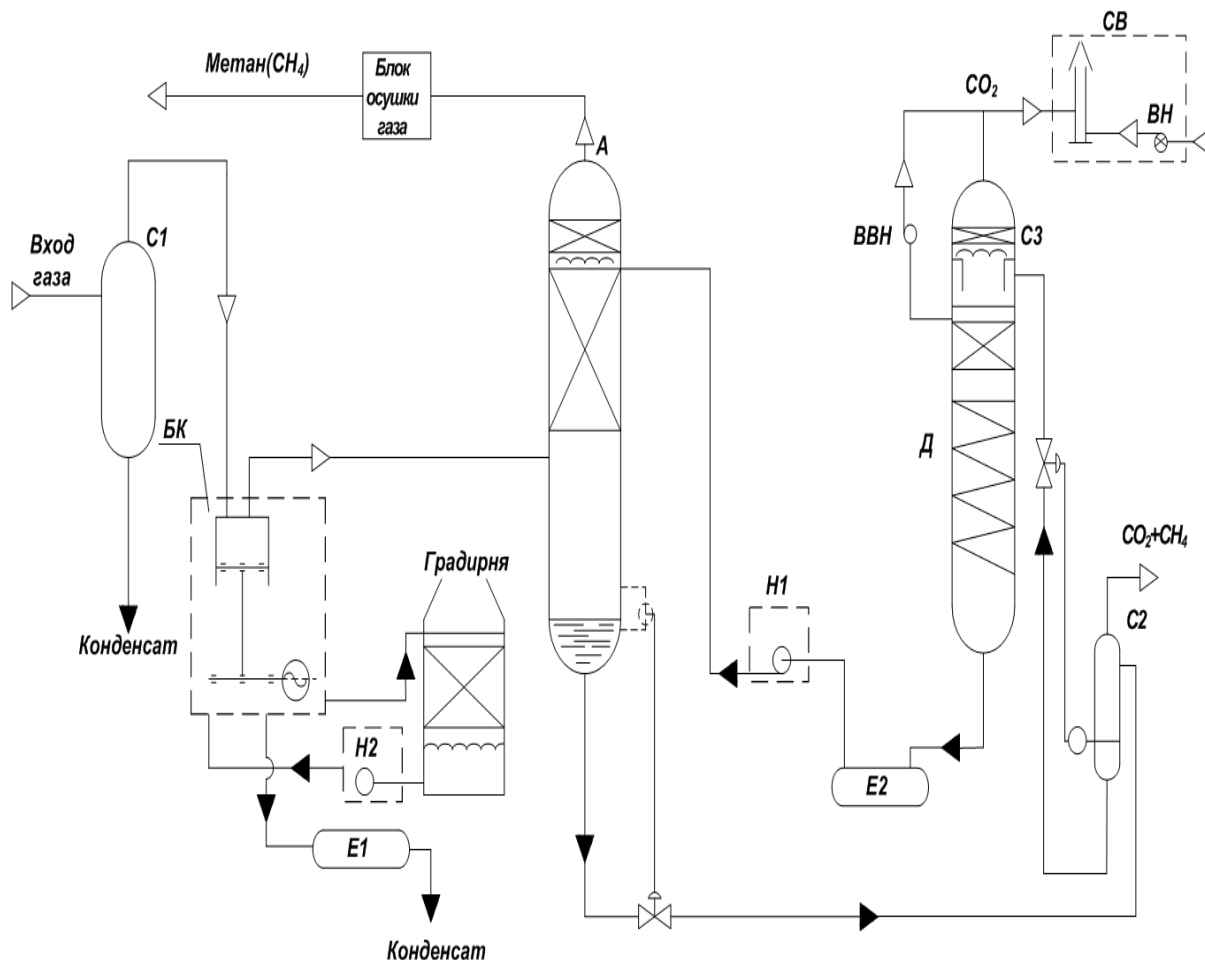


Рисунок 2.27 – Принципиальная технологическая схема комплекса очистки биогаза полигонов ТБО: *А* – адсорбер; *ВВН* – вакуум-насос; *Д* – десорбер; *Е1*, *Е2* – емкости; *БК* – блок компрессоров; *Н1*, *Н2* – блок насосов; *С1* – входной сепаратор; *С2* – сепаратор промежуточный; *С3* – сепаратор десорбера; *СВ* – свеча рассеивания

Очищенный от CO_2 газ с давлением 6,6–6,8 МПа отводится из верхней части абсорбера *А* и по трубопроводу подается в блок осушки, где установлены два адсорбера, заполненные силикагелем и работающие попеременно: когда один из адсорберов находится в режиме осушки, другой – в режиме регенерации. Переключение режима работы адсорберов осуществляется через каждые 4 часа. Из адсорбера осушенный газ давлением 6,5 МПа по трубопроводу направляется потребителю. Из нижней части абсорбера *А* абсорбент, насыщенный диоксидом углерода, отводится в промежуточный сепаратор *С2* для отделения растворенного метана. Газовая фаза из сепаратора направляется на регенерацию абсорбента в блок осуш-

ки. Жидкая фаза из сепаратора *C2* подается в верхнюю часть десорбера *Д*, где установлены вихревые элементы. Газожидкостный поток приобретает вращательное движение; при этом жидкая фаза стекает по стенке аппарата и попадает на провальные тарелки, а далее через переливное устройство перетекает в нижнюю вакуумную часть десорбера.

Выделившийся из абсорбента газ, содержащий 98–99 % CO_2 , через центральный патрубок поступает в сепарационную часть десорбера *C3* для отделения капельной жидкости и далее по трубопроводу направляется на свечу рассеивания, снабженную вентилятором *ВН*. При необходимости на линии может быть установлен блок получения диоксида углерода.

Поступивший в нижнюю вакуумную часть десорбера *Д* частично дегазированный абсорбент проходит через гидрозатвор и стекает по переливным тарелкам в кубовую часть аппарата. В кубовой части десорбера вакуум-насосом *ВВН* поддерживается разрежение, за счет чего из абсорбента дополнительно выделяется CO_2 , который по трубопроводу отводится на свечу рассеивания. Из нижней части десорбера регенерированный абсорбент самотеком отводится в емкость *E2*, откуда насосами блока *Н1* подается снова в абсорбер *A*. Отвод конденсата из коллекторов блока компрессоров осуществляется в дренажную емкость *E1*. Подача воды на охлаждение цилиндров компрессоров, а также охлаждение и уплотнение насосов абсорбента осуществляется электронасосными агрегатами, которые установлены в блоке насосов *Н2*. Охлаждение горячей воды осуществляется в градирне.

Техническая характеристика комплекса приведена в табл. 2.16.

Таблица 2.16 – Техническая характеристика комплекса

Наименование параметра, единица измерения	Численное значение параметра	
	на входе в комплекс	на выходе из комплекса
Расход биогаза, $\text{м}^3/\text{час}$	4250	2300
Давление, МПа	0,107	6,5
Температура, $^{\circ}\text{C}$, не более	+ 35	+ 40

Состав исходного и очищенного газа приведен в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Компонентный состав исходного и очищенного газа

Наименование компонентов	Состав по объему, %	
	на входе в комплекс	на выходе из комплекса
Метан (CH ₄)	57,00	94,54
Диоксид углерода (CO ₂)	41,50	не более 3,00
Азот (N ₂)	1,10	1,80
Кислород (O ₂)	0,40	0,66
Содержание паров воды, г/м ³	наличие капельной влаги	не более 0,11

2.3.3. Оборудование системы сбора и хранения биогаза

Выбор оборудования системы сбора и хранения биогаза, в первую очередь зависит от производительности биогазовой установки и от того, для каких целей будет использован биогаз. Большое значение имеет также рабочее давление в метантенке, в зависимости от которого следует рассматривать два варианта схем сбора и транспортирования газа:

- метантенк работает под избыточным давлением;
- метантенк работает под вакуумом.

В первом случае транспортирование биогаза до сборника осуществляется за счет избыточного давления в газовой полости метантенка.

Во втором случае необходимо использовать оборудование для отсоса биогаза из метантенка и его транспортировки.

Принципиальная технологическая схема сбора и использования биогаза по первому варианту представлена на рис. 2.28.

Во втором варианте на линии метантенк-сборник биогаза дополнительно устанавливают устройство для отсоса биогаза.

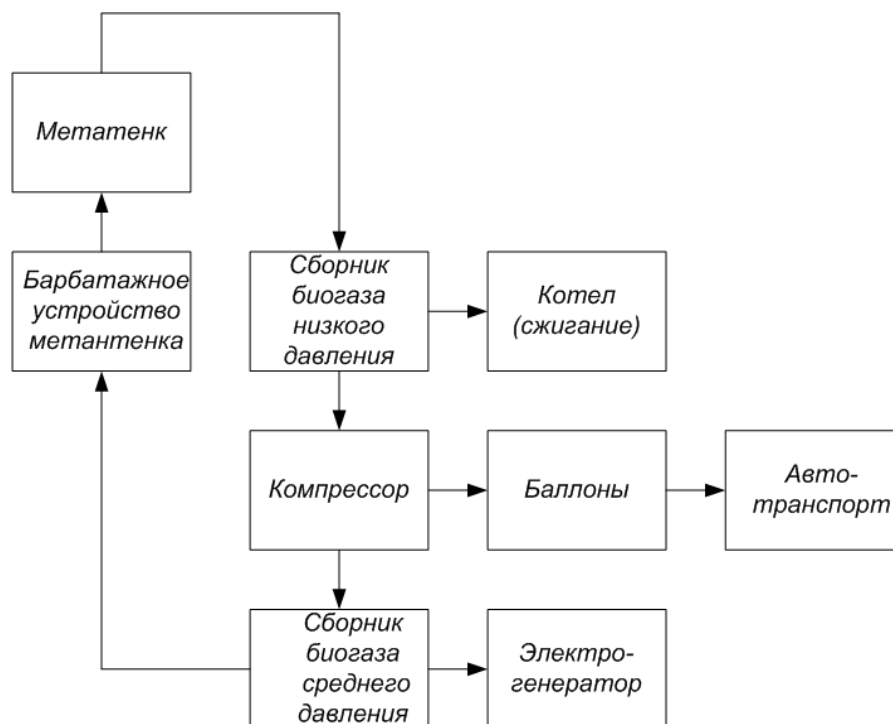


Рисунок 2.28 – Принципиальная технологическая схема сбора и использования биогаза

2.3.3.1. Сборники биогаза

В зависимости от способа использования биогаза применяют сборники (газгольдеры) низкого (до 5 кПа.), среднего (0,2–2 МПа) и высокого (свыше 20 МПа) давления. Наиболее распространенные конструкции сборников биогаза схематично показаны на рис. 2.29, 2.30 и 2.31.

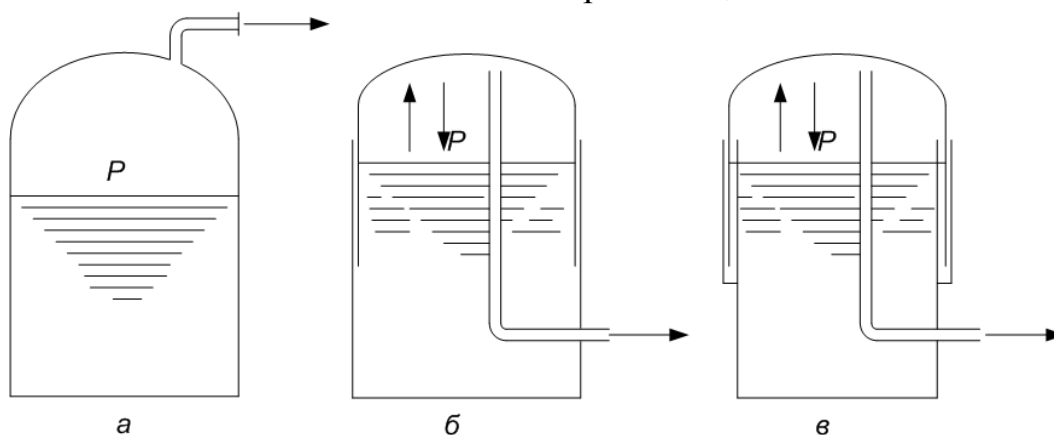


Рисунок 2.29 – Газгольдеры мокрые низкого давления: *а* – сборник постоянного объема, совмещенный с метантенком ($p = 1\text{--}3$ кПа.); *б* – сборник переменного объема, совмещенный с метантенком ($p < 5$ кПа.); *в* – сборник переменного объема, совмещенный с метантенком ($p < 5$ кПа.)

Наибольшее распространение имеют мокрые газгольдеры (рис. 2.32), которые представляют собой металлический (реже – пластмассовый) колокол 1, погруженный открытым концом в бассейн с водой 2. Под колокол подводятся газопроводы для подачи биогаза. Под давлением веса колокола создается низкое давление. Высота колокола определяет высоту водяного резервуара. Для ограничения высоты водяного резервуара колокол изготавливают из нескольких звеньев – телескопических колец; кольца соединены между собой герметически при помощи гидрозатворов. Высота столба жидкости в затворах должна быть больше высоты, соответствующей избыточному давлению в газгольдере.

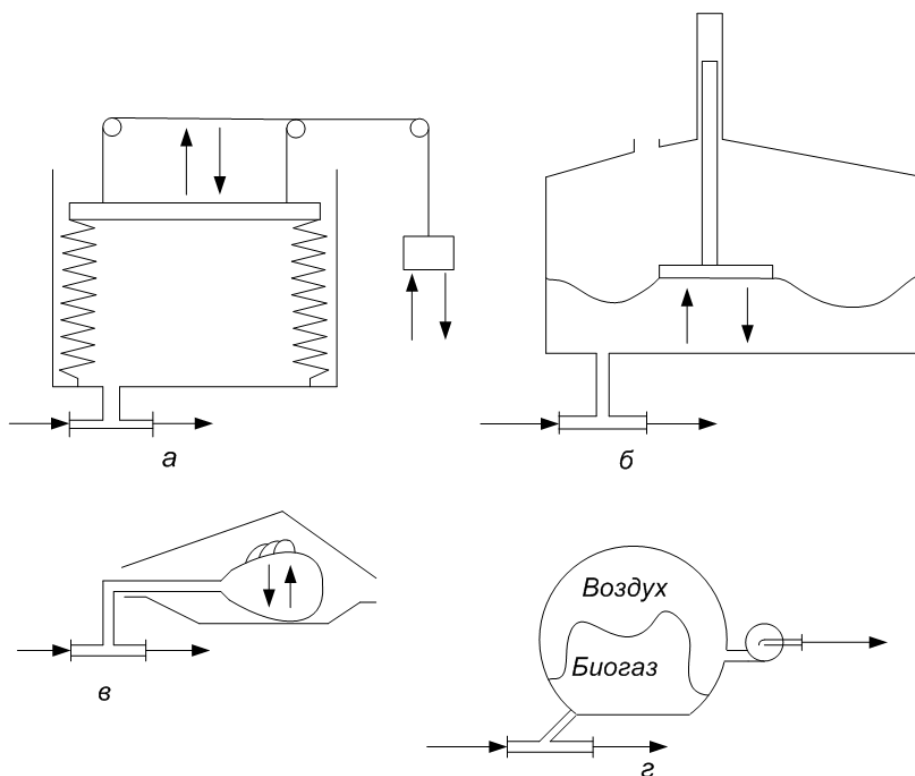


Рисунок 2.30 – Газгольдеры сухие низкого давления с гибкими элементами: а, б, в – с регулированием давления с помощью противовесов; г – с регулированием давления пневматическим способом

Верхний край каждого звена изогнут внутрь, нижний – наружу. Когда колокол под давлением газа поднимается вверх, желоба подвижных звеньев входят в зацепление, и вода, находящаяся в каждом нижнем желобе, создает гидравлический затвор.

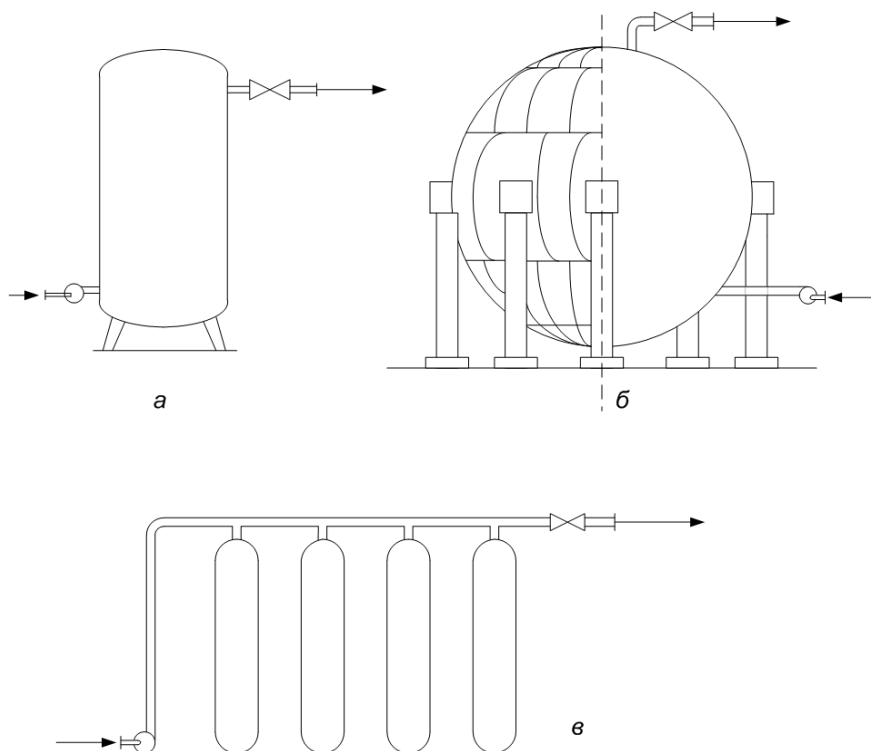


Рисунок 2.31 – Сборники биогаза среднего и высокого давления:
а – цилиндрический вертикальный среднего давления (0,2–2МПа);
б – сферической формы среднего давления;
в – цилиндрический высокого давления (> 20МПа).

Таким образом, звенья колокола создают полость для сбора газа и поддержания давления. Для неизменного положения подвижных звеньев относительно оси резервуара они снабжаются роликами, скользящими по направляющим. Число подвижных звеньев обычно не более пяти.

Газгольдеры мокрого типа устанавливаются в специальных зданиях или на открытом воздухе. Основными недостатками мокрых газгольдеров такого типа является высокая стоимость, большой расход металла и необходимость постройки специальных зданий или устройств для обогрева гидрозатворов в зимнее время.

На рис. 2.30 показаны схемы сухих газгольдеров. Общим в конструкциях сухого и мокрого газгольдеров является то, что избыточное давление в газовой полости в обоих случаях создается противовесами или пневматическим наддувом. Одним из основных преимуществ сухих газгольдеров является возможность установки на открытых площадках.

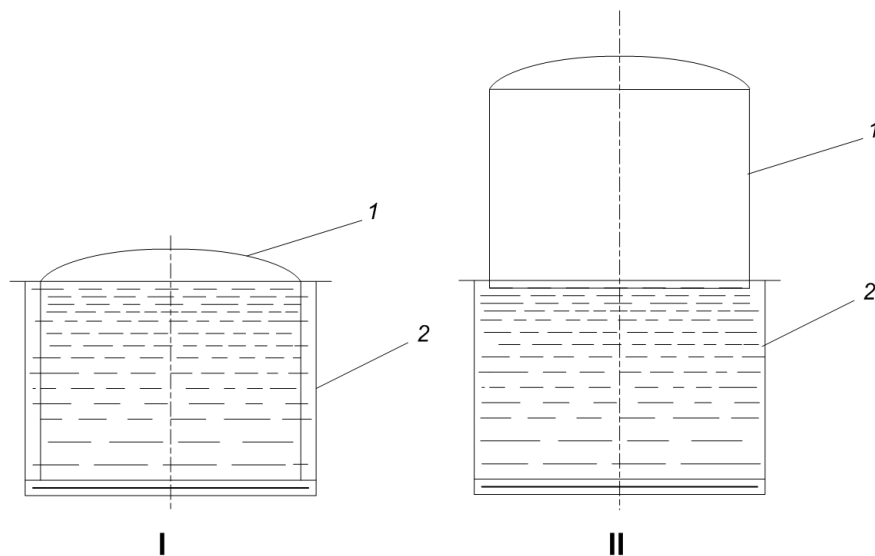


Рисунок 2.32 – Мокрый газгольдер после опорожнения (I) и заполнения газом (II); 1 – колокол; 2 – бассейн

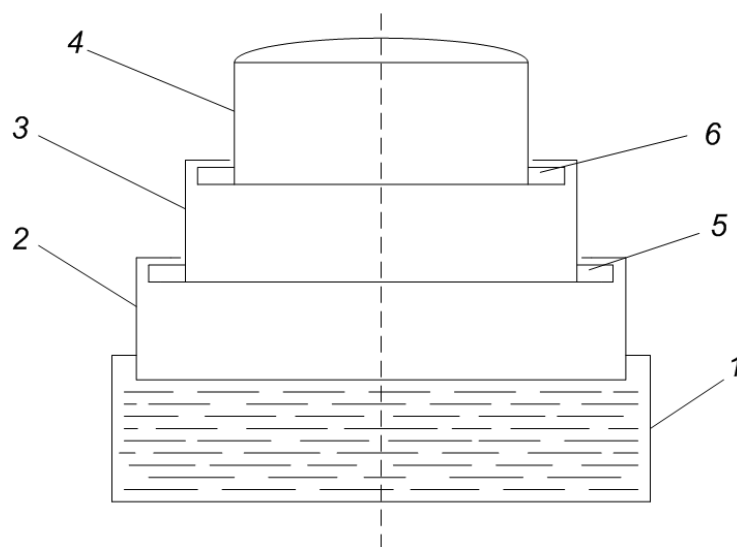


Рисунок 2.33 – Мокрый газгольдер с телескопическими кольцами:
1 – бассейн; 2, 3, 4 – звенья колокола; 5, 6 – гидравлические затворы

Биогаз из сухого газгольдера выходит с той же влажностью, с которой поступает. Давление биогаза в сухом газгольдере менее подвержено изменениям.

Сборники биогаза постоянного объема среднего и высокого давления представляют собой герметически закрытые цилиндрические или сферические резервуары, в которые газ подается под давлением. По сравнению со сборниками низкого давления они более компактны, не нуждаются в обо-

греве и просты в эксплуатации, но требуют затрат энергии на компримирование газа.

При определении объема газгольдера следует исходить из возможностей использования биогаза. Если весь газ будет направляться потребителю, то объем газгольдера будет определяться запасом, необходимым для обеспечения стабильной работы потребляющего оборудования (рис. 2.34).

Полезный объем W мокрого газгольдера определяется по формуле

$$W = \frac{\pi D^2}{4} (H - h_0). \quad (2.30)$$

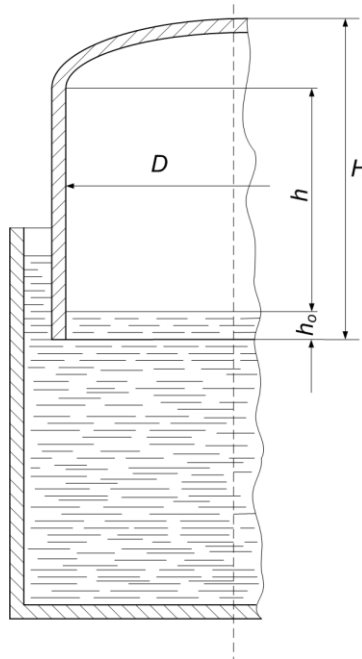


Рисунок 2.34 – К расчету мокрого газгольдера

Учитывая, что газгольдер является не только сборником газа, но и устройством, регулирующим его давление, после определения геометрических размеров (D , h , h_0) необходимо сделать проверочный расчет на истинное давление в газгольдере. Истинное давление биогаза под колоколом p определится из уравнения

$$p = p_0 - p' - p'', \quad (2.31)$$

где p_0 – давление газа, создаваемое под действием массы колокола; p' – понижение давления за счет выталкивающей силы, действующей на погруженную часть колокола; p'' – понижение давления за счет разности удельных весов воздуха и биогаза.

$$p_0 = \frac{4 \cdot C_T}{\pi \cdot D^2}, \quad (2.32)$$

где C_T – масса колокола.

$$p' = \frac{4 \cdot C'_T}{\pi \cdot D^2}, \quad (2.33)$$

здесь C'_δ – масса колокола с учетом выталкивающей силы:

$$C'_\delta = 0,128 \cdot (H - h) \cdot (S/H), \quad (2.34)$$

где S – масса стенок колокола; 0,128 – коэффициент, учитывающий действие выталкивающей силы:

$$p'' = \frac{4 \cdot C''_\delta}{\pi \cdot D^2}, \quad (2.35)$$

где C''_δ – сила, направленная вверх, возникающая вследствие разности плотностей воздуха и биогаза:

$$\tilde{N}''_\delta = (\rho_a - \rho_b) \frac{\pi \cdot D^2}{4} h, \quad (2.36)$$

здесь ρ_b и ρ_a – плотность воздуха и биогаза соответственно.

По результатам проверочного расчета давления в газгольдере корректируются размеры газгольдера.

Если система потребления биогаза работает под давлением, то давление в газгольдере должно соответствовать давлению на входе компрессора, подающего биогаз потребителю. Давление нагнетания компрессора и его производительность определяются в зависимости от параметров потребляющего оборудования.

При работе системы под вакуумом разрежение на входе в вакуум-насос должно соответствовать разрежению в метантенке, а давление нагнетания вакуум-насоса – давлению в газгольдере. Производительность вакуум-насоса должна быть соизмерима с производительностью метантенка по биогазу.

2.3.3.2. Оборудование для компремирования биогаза

В системах сбора и использования биогаза наибольшее распространение имеют компрессоры: поршневые и ротационные.

Ротационные компрессоры (газодувки) используются при давлении

на выходе из компрессора (p_2) до 0,2 МПа и характеризуются отношением давления на выходе к давлению на входе в компрессор (p_1), как $p_2 : p_1 = 1,1 : 3$. Поршневые компрессоры развивают значительно большие давления на выходе и характеризуются отношением $p_2 : p_1 = 3 : 1000$.

Разновидностью ротационной машины является ротационная газодувка, изображенная на рис 2.35. Газодувка состоит из чугунного корпуса 1, в котором на двух параллельно установленных валах вращаются два фасонных чугунных барабана (поршня) 2. При вращении эти поршни плотно касаются друг друга и в тоже время плотно прилегают к стенкам корпуса, образуя таким образом в корпусе две разобщенные камеры, в одной из которых происходит всасывание, а в другой – нагнетание. При движении поршней газ находится в камере без изменения объема и давления до момента соединения ее с нагнетательным патрубком. В этот момент газ сжимается и выталкивается через нагнетательный патрубок. Ведущий вал газодувки приводится во вращение через ременную передачу или редуктор от электродвигателя. Второй вал получает движение через зубчатую передачу с передаточным числом $i = 1 : 1$.

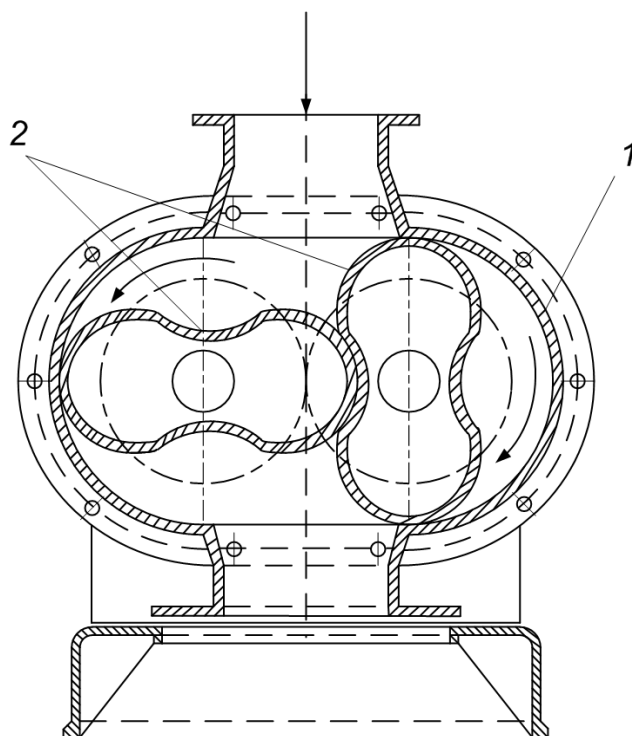


Рисунок 2.35 – Ротационная газодувка:
1 – кожух; 2 – барабан (поршень)

Отличительной особенностью таких газодувок является простота устройства и производительность в широких пределах – от 2 до 800 м³/мин – при давлении 0,08 МПа и к.п.д. 0,65–0,85. По сравнению с поршневыми машинами ротационные компрессоры и газодувки имеют ряд преимуществ, а именно:

- равномерность подачи газа;
- простота изменения производительности путем изменения числа оборотов;
- отсутствие клапанов;
- компактность.

Они требуют тщательного монтажа; их КПД ниже, чем у поршневых компрессоров. По этим причинам их редко используют для компремирования биогаза.

Наиболее широко в технике компремирования газов распространены поршневые компрессоры. В составе биогазовых установок используют компрессоры малой производительности (до 10 м³/мин) и средней производительности (10–30 м³/мин). В зависимости от требуемого давления нагнетания применяют компрессоры:

- низкого (до 1,0 МПа);
- среднего (1,0–8,0 МПа);
- высокого давления (8,0–23,0 МПа).

Специалистами НИИкомпрессормаш (г. Сумы) разработана и изготовлена компрессорная установка 4ГУ 0.25-0,4/230 для комплектования установки «Биогаз 2-302С» [53]. Она состоит (рис 2.36) из компрессора с воздушным принудительным охлаждением, системы трубопроводов, блока пластинчатых холодильников, влагомаслоотделителей, рамы и заправочной колонки. Имеется система контроля основных параметров работы компрессора, состоящая из местного и дистанционного щитов управления. В качестве привода использован электродвигатель с клиноременной передачей. Установка может эксплуатироваться на открытом воздухе под навесом без фундамента при температуре от –20 до +30 °С.

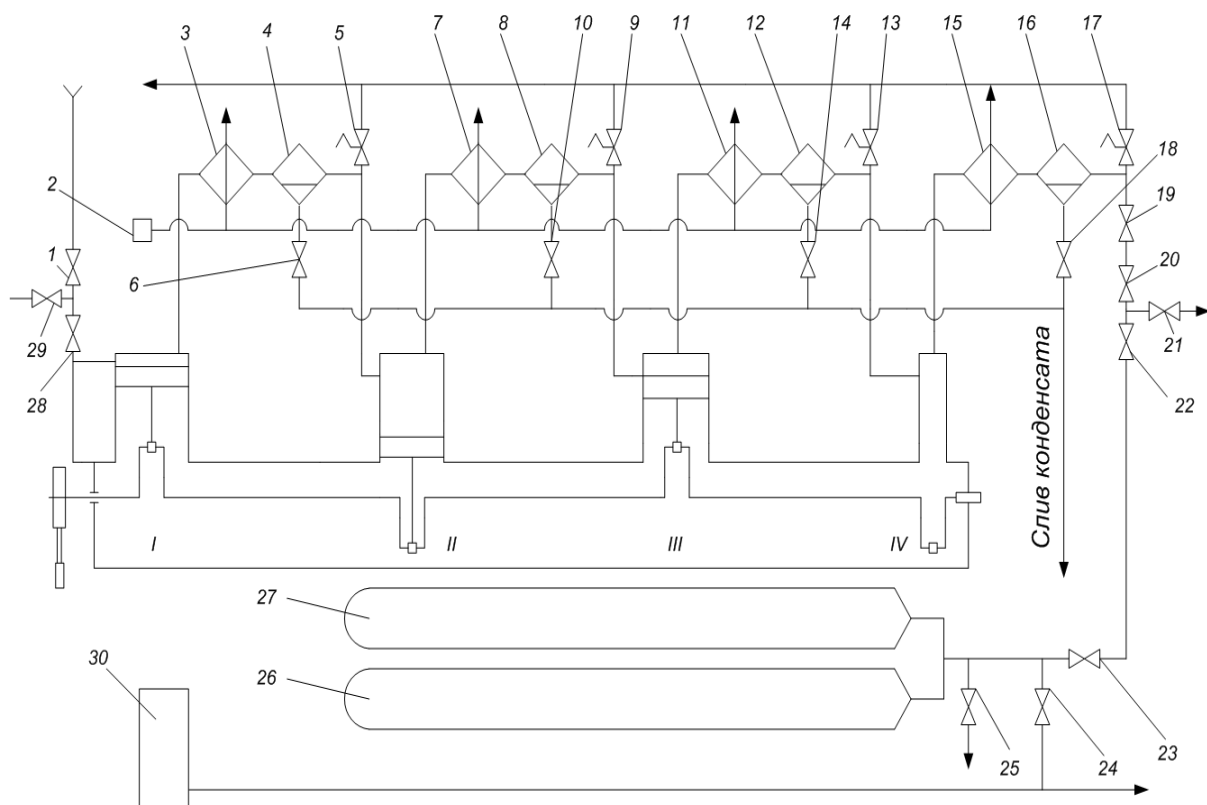


Рисунок 2.36 – Схема компрессорной установки: 1, 6, 10, 14, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29 – вентили; 2 – вентилятор; 3, 7, 11, 15 – блоки холодильников; 4, 8, 12, 16 – влагомаслоотделители; 5, 9, 13, 17 – предохранительные клапаны; 19 – обратный клапан; 26, 27 – баллоны; 30 – заправочная колонна

Газ по всасывающему трубопроводу под давлением 0,101 МПа через вентили 1 и 28 (D_y 50, P_y 2,5 МПа) поступает в цилиндр I ступени компрессора, где сжимается до 0,43 МПа, охлаждается в блоке холодильников 3, очищается во влагомаслоотделителе 4. Очищенный газ поступает в цилиндр II ступени и сжимается до 1,71 МПа. Пройдя блок холодильников 7, влагомаслоотделитель 8, он поступает в цилиндр III ступени компрессора, где сжимается до 7,66 МПа. Затем через блок холодильников 11 и влагомаслоотделитель 12, газ подается в цилиндр IV ступени. Сжатый до конечного давления газ охлаждается в блоке холодильников 15 до 45°C и через влагомаслоотделитель 16, обратный клапан 18 (D_y 10, P_y 40 МПа) и запорные вентили 20 и 22 (D_y 6, P_y 40 МПа) поступает в баллоны 26 и 27 рампы.

При аварийном повышении давления газа в установке срабатывают предохранительные клапаны 5, 9, 13, 17 (D_y , P_y 40 МПа) и сбрасывают его в газосборник. Регулирование конечного давления производят с помощью

запорных вентилей 20 и 22, а при подсоединенной рампе – вентилем 23 (D_y 6, P_y 40 МПа). Для охлаждения блока холодильников служит вентилятор 2.

Влагу и масло из влагомаслоотделителей удаляют продувкой один раз в смену в течение 5–10 с поочередно, кратковременно открывая и закрывая продувочные вентили 6, 10, 14 (D_y 10, P_y 10 МПа) и 18 (D_y 6 и P_y 40 МПа) с ручным приводом. Продувку баллонов выполняют при закрытом вентиле 24 и открытом вентиле 25 (D_y 6, P_y 40 МПа).

Во время работы установки вентили 1, 28, 20 и 22 открывают, а при длительной остановке закрывают и открывают вентили 21 (D_y 6, P_y 40 МПа) и 29 (D_y 15, P_y 10 МПа).

При заполнении баллонов сжатый до конечного давления газ через вентиль 24 (D_y 6, P_y 40 МПа) подается на потребление через заправочную колонку 30 или для других целей: барботажа, сжигание и т.д.

Техническая характеристика установки представлена в табл. 2.18

Таблица 2.18 – Техническая характеристика компрессорной установки

Название параметра, единица измерения	Численное значение параметра
Тип компрессора: поршневой V-образный четырехступенчатый простого действия	
Производительность по всасыванию газа, m^3/c	0,0065
Начальное абсолютное давление газа, МПа ($кгс/см^2$)	0,101 (1.03)
Конечное номинальное давление нагнетания, МПа ($кгс/см^2$)	22,8 (230)
Максимальная температура газа на выходе из установки, $^{\circ}C$	45
Мощность, потребляемая компрессором при номинальных производительности и давлении (с учетом вспомогательного оборудования), кВт	7,5
Габаритные размеры, мм установки рампы	1420×1410×1780 2200×800×1610
Масса, кг установки с рампой рамы	3500 2765

Установка в комплекте с заправочной колонкой может быть использована для заправки автотранспорта как биогазом, так и природным газом.

Аналогичные функции может выполнять и пост заправочный ПЗ-1, который также комплектуется заправочной колонкой, но предназначен для эксплуатации при температуре в интервале минус 40° С – плюс 40° С (табл. 2.19). Для компремирования биогаза возможно использование и других типов компрессоров. Например, винтовой компрессор можно использовать для создания давления до 1,0 МПа при производительности до 20 м³/мин. Однако не везде имеются производственные условия для изготовления таких компрессоров, в то время как производство поршневых компрессоров любой производительности и давления не вызывает трудностей.

Для систем, где предусматривается отсос биогаза из метантенков, используются вакуум-насосы.

При выборе вакуум-насоса необходимо учитывать:

- производительность метантенка по биогазу;
- динамику выделения газа и скорость отсоса газа;
- объем газовой полости метантенка, если отсос ведется непосредственно из метантенка;
- суммарный объем газовой полости метантенка и сборника биогаза постоянного объема, если отсос ведется из сборника биогаза.

В биогазовых установках могут использоваться поршневые и ротационные вакуум-насосы. Поршневые вакуум-насосы по принципу действия не отличаются от поршневых машин для сжатия газов. Они бывают двух типов – сухие и мокрые. Первые отсасывают только газы, а вторые – смесь газа и жидкости. Мокрые вакуум-насосы могут создавать разрежение до 80–85 %, сухие – до 96–99 %.

Таблица 2.19 – Техническая характеристика поста заправочного ПЗ-1

Название параметра, единица измерения	Численное значение параметра
Тип компрессора: поршневой V-образный, трехступенчатый с водяным охлаждением	
Сжимаемый газ (биогаз или природный газ)	
Производительность, приведенная к условиям всасывания, м ³ /с	0,0116
Начальное абсолютное давление газа, МПа (кгс/см ²)	0,102 (1,03)
Конечное номинальное давление нагнетания МПа (кгс/см ²)	5,1 (51,4)
Мощность потребляемая компрессором, кВт	10
Габаритные размеры установки, мм	
длина	1950
ширина	2190
высота	1440
Масса компрессорной установки, кг	1800
Габаритные размеры колонки заправочной, мм	
длина	900
ширина	760
высота	1460
Масса колонки, кг	195

Наибольшее распространение в биогазовых системах имеют ротационные водокольцевые вакуум-насосы (рис. 2.37). В цилиндрическом корпусе 1 эксцентрично установлено рабочее колесо 2 с неподвижными лопатками. Корпус насоса заполняется до определенного уровня водой. При вращении колеса образуется водяное кольцо, которое при наличии эксцентриситета ограничивает ячейки между отдельными лопастями.

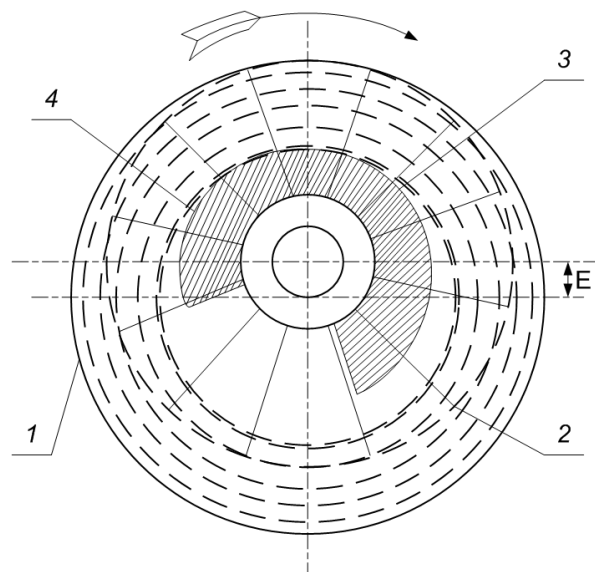


Рисунок 2.37 – Схема устройства ротационного вакуум-насоса:

1 – корпус; 2 – рабочее колесо; 3, 4 – отверстия

За время первой половины оборота вала объем ячеек увеличивается, и через отверстие 3 в торцевой крышке корпуса происходит засасывание газа. При второй половине оборота объем ячеек уменьшается, происходит сжатие газа и выталкивание его через нагнетательное отверстие 4. Благодаря отсутствию клапанов и распределительных механизмов такой насос практически не засоряется. Большим преимуществом насоса является возможность его непосредственного соединения с электродвигателем, что упрощает ее эксплуатацию: установка компактна, проста в обслуживании и ремонте. Промышленностью серийно выпускаются водокольцевые вакуум-насосы различной производительности – от 0,75 м³/мин до 300 м³/мин (табл. 2.20).

Таблица 2.20 – Характеристики вакуум-насосов

Характеристика	Вакуум-насосы					
	ВВН-0,75/0,4	ВВН-1,5/0,4	ВВН-3/0,4	ВВН-12/0,4	ВВН-25/0,4	ВВН 2-50
1	2	3	4	5	6	7
Номинальная производительность, м ³ /мин	0,75	05	3	2	30	50
Давление всасывания (абсолютное), кгс/см ²	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2
Температура рабочей воды, °С	15	15	15	15	15	–

Продолжение таблицы 2.20

1	2	3	4	5	6	7
Расход рабочей воды, л/мин	1,5	1,8	6,5	—	40	—
Мощность потребляемая, кВт	1,35	2,61	4,65	30	44	110
Габаритные размеры, мм						
длина	350	475	610	2200	2155	3000
ширина	380	380	420	600	645	1000
высота	460	510	815	1300	980	1750
Масса, кг	40	68,3	147,5	700	1165	2700

Пример расчета системы сбора биогаза

Определить основные параметры системы сбора биогаза для установки производительностью $2500 \text{ м}^3/\text{сут}$ с использованием сухого сборника биогаза. Давление в метантенке принять $2,0\text{--}4,0 \text{ кПа}$.

Задачей рассчитываемой схемы является:

- 1) обеспечить постоянство давления в метантенке;
- 2) обеспечить постоянство давления на выходе из ресивера, величина которого определяется требованиями потребителя газа.
- 3) обеспечить сбор и накопление определенного запаса биогаза для гарантированной бесперебойной работы потребителя.

Графически схема будет выглядеть следующим образом (рис. 2.38).

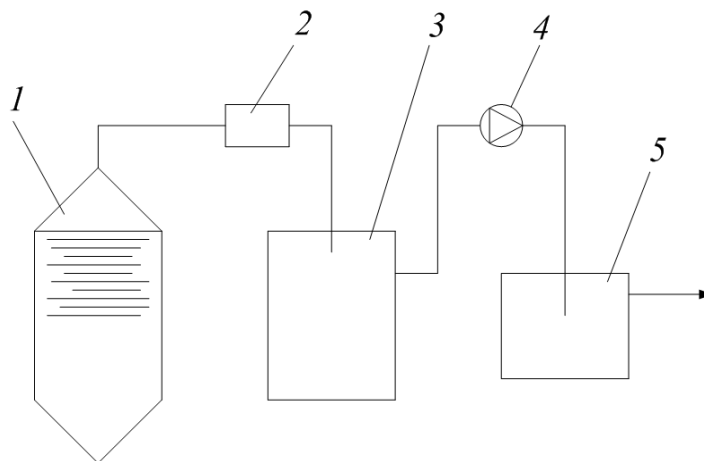


Рисунок 2.38 – Система сбора биогаза

В газовой полости 1 метантенка биогаз собирается под постоянным давлением, величина которого задается регулятором давления 2. В случае

превышения заданного давления излишки газа направляются в сборник 3. При достижении давления в сборнике биогаза, соответствующего давлению в газовой полости, включается вакуум-насос 4, и газ откачивается в ресивер 5, где он содержится под более высоким давлением. Величина давления в ресивере соответствует давлению в системе, потребляющей биогаз (обычно 0,1–0,15 МПа).

Определим часовую производительность установки по биогазу:

$2500 : 24 = 104,1 \text{ м}^3/\text{ч}$; соответственно потребляющее газ оборудование должно быть рассчитано не более чем на $104,1 \text{ м}^3/\text{ч}$, а производительность вакуум-компрессора – не менее чем $104,1 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Давление в системе сбора биогаза распределится следующим образом:

- в газовой полости метантенка – 4,0 кПа;
- в сборнике биогаза от 0 до 4,0 кПа;
- в ресивере от 4,0 кПа до 0,1 МПа.

Запас биогаза на непредвиденные остановки вакуум-насоса или потребляющего газоборудования создается за счет сборника биогаза, объем которого обычно соответствует двух-, трехкратной часовой производительности установки, т.е. $(2 \div 3) \times 104,1 \approx 250\text{--}300 \text{ м}^3$.

2.4. Использование биогаза для производства тепловой и электрической энергии

В мировой практике утилизация биогаза производится, главным образом, путем преобразования химической энергии газа в тепловую или в механическую. Технически это осуществляется либо путем непосредственного сжигания биогаза в котлах, либо путем совместного производства тепла и электроэнергии в когенерационных установках на базе двигателей внутреннего сгорания. Менее распространенным способом утилизации энергии биогаза, связанным с относительно большими затратами, является получение из него моторного топлива для автотранспорта или улучшение его состава до показателей качества природного газа с дальнейшей подачей в газовый трубопровод.

Оценку экономического потенциала биогаза как энергетического продукта следует производить по товарному биогазу – разности между общим количеством производимого биогаза и его количеством, расходуемым на

собственные нужды установки (поддержание теплового режима) и нужды хозяйства. Доля товарного биогаза, который может быть реализован как энергетический продукт, для каждого хозяйства можно определить графически с помощью диаграммы. Пример построения такой диаграммы для фермы с содержанием 75 голов КРС приведен на рис. 2.39 [54]. Это диаграмма – для так называемой внутрифермерской установки, построенной непосредственно на животноводческой ферме. Полученный биогаз используется для хозяйственных нужд, а удобрения – на прилегающих к ферме полях.

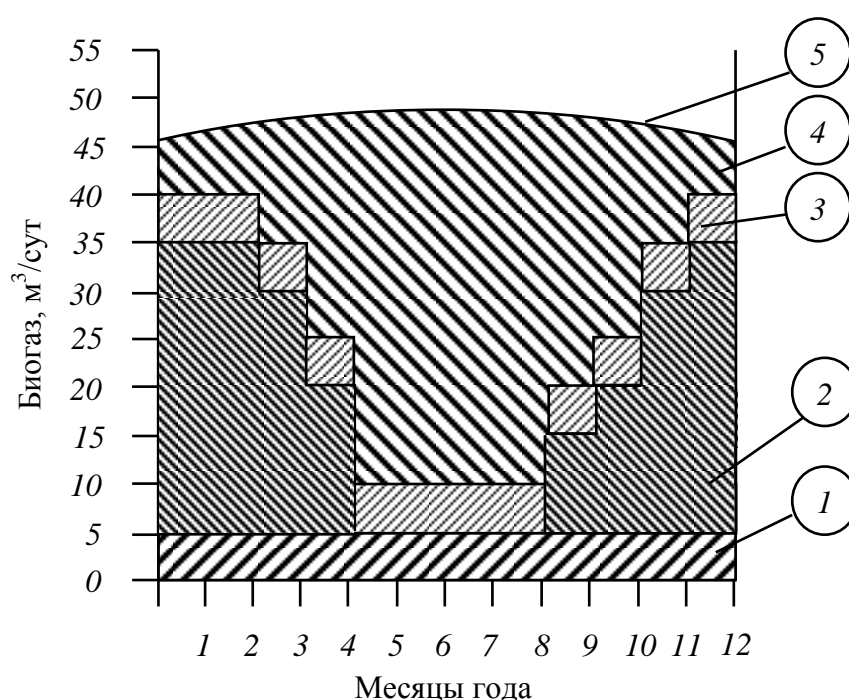


Рисунок 2.39 – Баланс расхода биогаза на ферме КРС: 1 – расход биогаза на домашнее хозяйство (приготовление пищи, горячее водоснабжение) для семьи из 4 человек; 2 – расход биогаза на отопление жилого помещения; 3 – расход биогаза на хозяйственные нужды фермы (доение, уборка и пр.); 4 – товарный биогаз; 5 – кривая выхода товарного биогаза

Подобные диаграммы могут быть построены также для централизованных биогазовых установок, рассчитанных на переработку навозных стоков нескольких сельхозпредприятий, расположенных неподалеку.

Производство электрической энергии осуществляется в электрогенераторах, в качестве привода которых используются двигатели внутреннего сгорания, работающие на биогазе. Эффективность использования биогаза для производства электроэнергии зависит от уровня цен на энергоносители.

Опыт эксплуатации биогазовых установок показывает, что для производства 1 кВт·ч электроэнергии необходимо сжечь в газовом двигателе 0,5–0,6 м³ биогаза. При этом только часть топлива превращается в механическую энергию, а значительное его количество теряется с горячими выхлопными газами.

Поэтому более рациональным является использование биогаза в газозлектрогенераторах, производящих электрическую энергию с одновременным производством тепловой энергии за счёт утилизации тепла выхлопных газов двигателей. Такие схемы целесообразно использовать в установках средней и большой производительности. В этом случае при сжигании 1 м³ биогаза можно получить 1,7–2,3 кВт электрической и 2,5–3,5 кВт тепловой энергии. Баланс расходования энергии биогаза при ее преобразовании в другие виды энергии приведен на рис.2.40 [20].

2.4.1.Оборудование для получения тепловой и электрической энергии из биогаза

Наиболее простым способом использования биогаза является сжигание его в водогрейных котлах. Для этих целей могут использоваться котлы, предназначенные для работы на природном газе, на жидком или твердом топливе с соответствующей реконструкцией топочной системы.

Луганское ЗАО «Термо» выпускает блоки водонагревательные БГВ-50 (рис. 2.41), которые входят в состав оборудования котельной.

Когенерационные установки на базе газовых двигателей с рекуперацией тепла выхлопных газов могут работать на биогазе или природном газе. Созданные по такой схеме стандартные энергоблоки итальянской фирмы Fiat при потреблении 8 м³/ч биогаза способны непрерывно снабжать электроэнергией бытовое оборудование мощностью 15 кВт и обеспечивать тепловой энергией в количестве 138 кДж/ч теплицу и теплотехническое оборудование коровника.

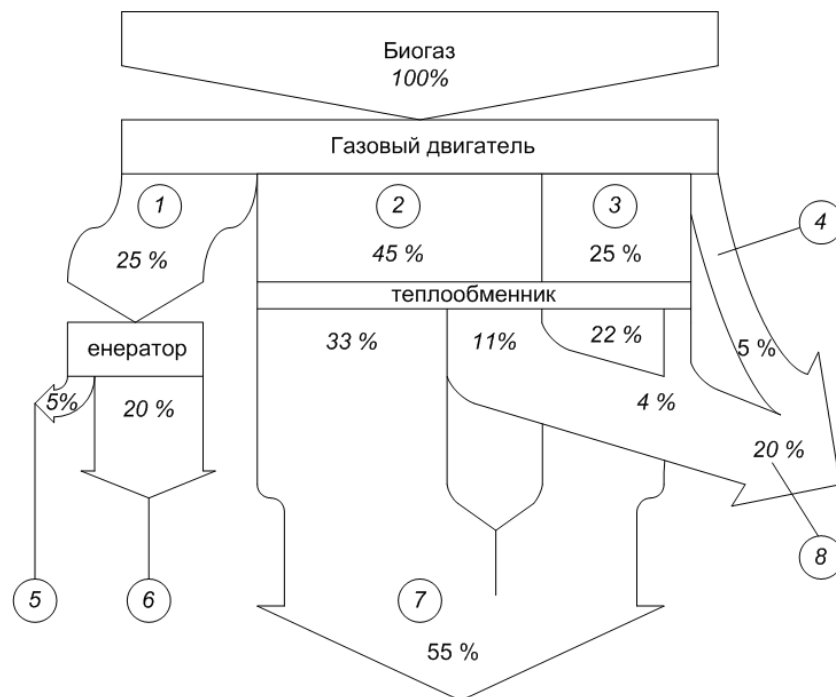


Рисунок 2.40 – Распределение энергии на станции, производящей электрическую и тепловую энергию: 1 – механическая энергия привода генератора; 2 – энергия продуктов сгорания; 3 – энергия охлаждающей воды газового двигателя; 4 – потери энергии в газовом двигателе; 5 – потери энергии в генераторе; 6 – электрическая энергия; 7 – тепловая энергия (используемая); 8 – суммарные потери энергии в теплообменнике и газовом двигателе

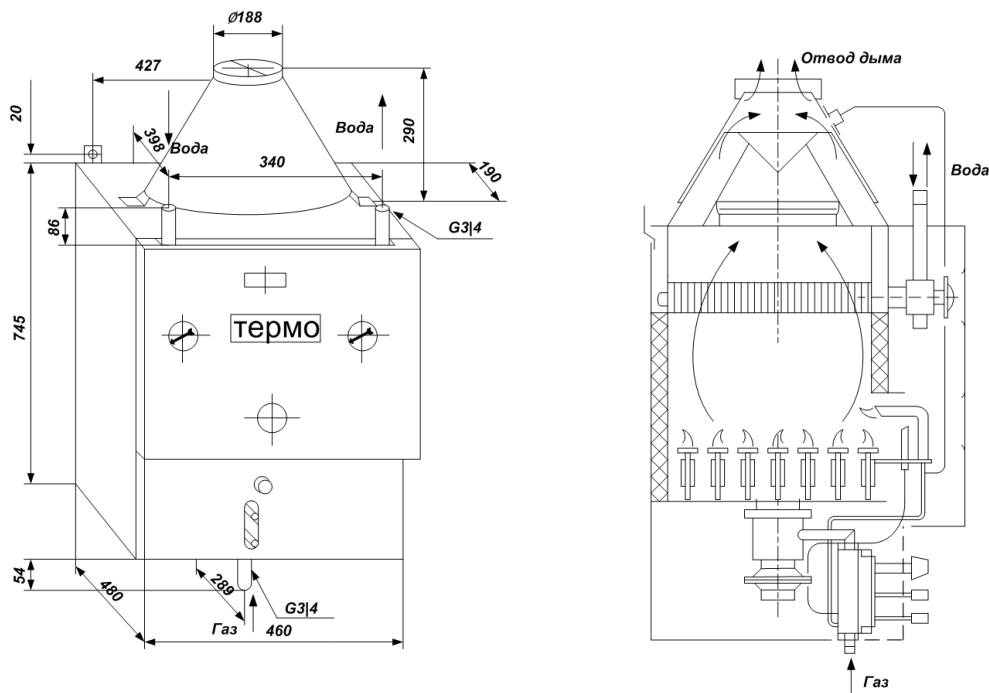


Рисунок 2.41 – Блок водонагревательный БГВ-50

Техническая характеристика блока БГВ-50

Номинальная тепловая мощность	50 кВт
Коэффициент полезного действия, не менее	0,92
Максимальный расход природного газа	5,43 м ³ /ч
Максимальная температура теплоносителя	90 °С
Пропускная способность по теплоносителю (воде)	6,7 м ³ /ч
Масса	50 кг

Венгерская фирма Ганц-Мотор выпускает несколько типов агрегатов, на которых из 1 м³ биогаза вырабатывается 4,3 кВт/ч электроэнергии и 6–7 кВт тепловой энергии при к.п.д. системы 0,88–0,9 [20]. Такой агрегат схематично изображен на рисунке 2.42, а его технические характеристики приведены в табл. 2.21.

Таблица 2.21 – Технические параметры агрегатов Венгерской фирмы Ганц-Мотор

Наименование показателей	Тип агрегата				
	I	II	III	IV	V
Электрическая мощность, кВт	290	385	575	775	875
Тепловая мощность, кВт	470	625	925	1250	1400
Расход газа, нм ³ /ч	88	115	170	223	250
Двигатель	6РА 185Е	8РА4 185Е	2РА4 185Е	16РА 185	18РА4 185С
Число оборотов, об/мин	1000	1000	1000	1000	1000
Рабочий объем, л	33,9	45,2	67,8	90,4	101,7
КПД агрегата, %	85–90	85–90	85–90	85–90	85–90

Аналогичные когенерационные установки на базе двигателей фирмы Caterpillar предлагает к использованию компания «Энерго-Альтернатива» (г. Севастополь). Технические данные таких установок приведены в табл. 2.22.

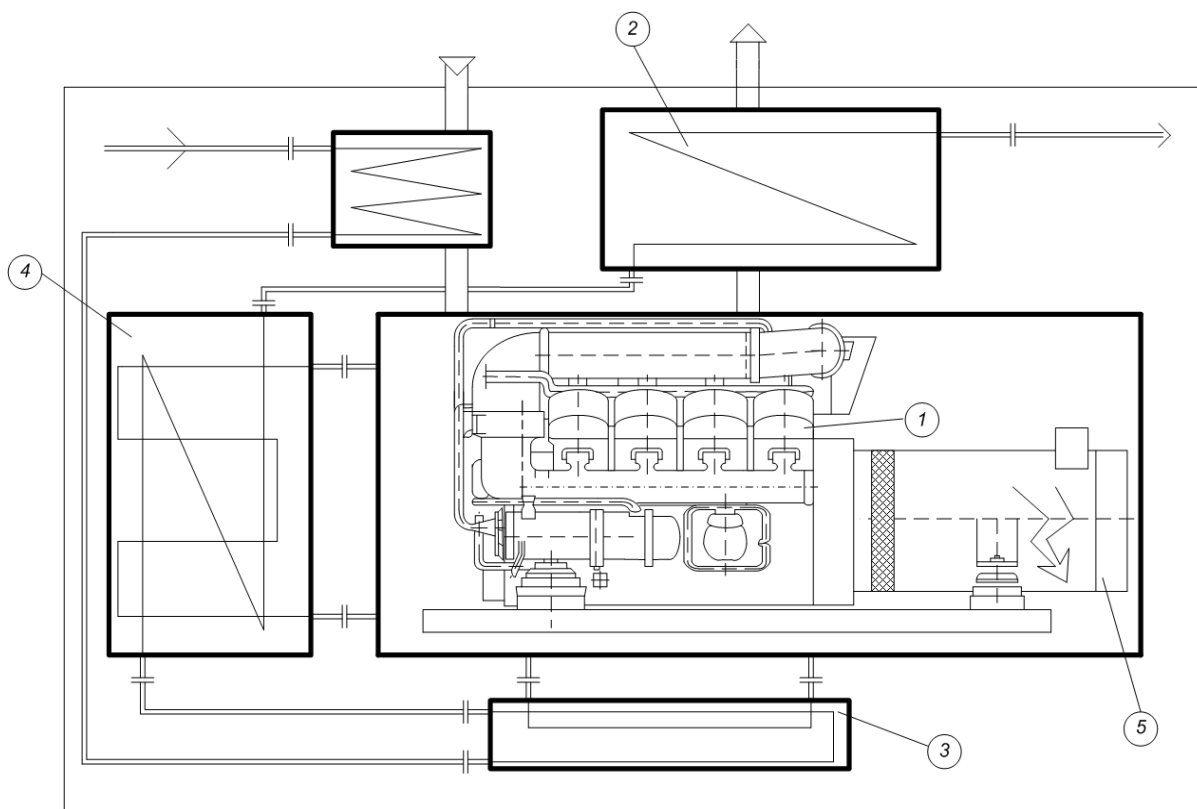


Рисунок 2.42 – Отопительный агрегат на базе газового двигателя: 1 – газовый двигатель; 2 – утилизатор тепла выхлопных газов; 3 – утилизатор тепла масла двигателя; 4 – утилизатор тепла охлаждающей воды двигателя; 5 – электрогенератор

2.4.2. Расчет теплового баланса биогазовой установки

На этапе проектирования биогазовой установки баланс производства тепловой энергии из биогаза и ее расходования рассчитывается по уравнению

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2.37)$$

где Q – количество тепла, которое можно получить при утилизации биогаза, производимого в течение суток, МДж/сут;

Q_1 – количество тепла, необходимое для подогрева суточной дозы загрузки исходного сырья до температуры сбраживания, МДж/сут;

Q_2 – количество тепла, необходимое для компенсации тепловых потерь в метантенке, МДж/сут;

Q_3 – количество тепла, которое можно получить при использовании товарного биогаза, МДж/сут.

Таблица 2.22 – Когенерационные установки на базе Caterpillar

Наименование параметров	G 3408	G 3508	G 3512	G 3516	G 3516B	G 3520B	G 3520C	G 3612
Номинальная электрическая мощность, кВт	255	519	770	1030	1172	1460	2016	3900
Максимальная тепловая мощность, кВт	419	653	1010	1387	1385	1852	2372	3152
Максимальная тепловая мощность, Гкал	0,36	0,56	0,86	1,1	1,19	1,59	2,03	2,7
Потребляемая мощность топлива, кВт	775	1362	2068	2757	2967	3812	5034	7226
К.п.д. электрический, %	32,9	38,1	37,2	37,4	39,5	38,3	40	40,1
К.п.д. тепловой, %	54,1	47,9	48,9	50,3	46,6	48,5	47,1	43,6
К.п.д. общий, %	87	86	86,1	87,7	86,1	86,8	87,1	83,7
Расход газа при 100 % мощности, м ³ /ч	82	144	219	292	312	404	553	765
Расход газа при 75 % мощности, м ³ /ч	63,3	113	171	229	244	313	412	590
Расход газа при 50 % мощности, м ³ /ч	45,1	81	123	162	174	223	287	414
Расход масла, г/кВт·ч	0,3/0,7	0,3/0,5	0,3/0,5	0,3/0,5	0,3/0,5	0,3/0,5	0,3/0,5	0,3/0,5
Теплотворность газа, МДж/м ³	34	34	34	34	34	34	34	34
Давление газа, кПа	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20
Количество воздуха при сжигании, нм ³ /ч	1260	2230	3340	4480	5207	6445	9070	15100
Минимальное количество вентиляционного воздуха, нм ³ /ч	10500	14200	21000	22800	22500	48500	33000	75000
Количество продуктов сгорания, нм ³ /ч	1310	2390	3850	4800	5557	6856	9670	15394
Температура продуктов сгорания, °С	347	453	496	489	467	492	465	370
Макс. противодавление продуктов сгорания за фланцем, Па	40	60	100	100	100	100	100	100
Количество смазочного масла в двигателе, л	170	231	338	423	423	504	541	1030
Объем охлаждающей жидкости в первичном контуре, л	105	215	310	370	370	485	490	1200

$$Q = B_{\text{б}} \cdot q \cdot \kappa, \quad (2.38)$$

где $B_{\text{б}}$ – производительность установки по биогазу, м³/сут.;

q – теплотворная способность биогаза, МДж/м³;

κ – к.п.д. устройства, переводящего энергию биогаза в тепловую энергию:

$$Q_1 = B_{\text{н}} \cdot C_p \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{к}}), \quad (2.39)$$

где $B_{\text{н}}$ – производительность установки по исходному сырью (доза суточной загрузки), м³/сут.;

C_p – удельная массовая теплоемкость жидкого навоза, кДж/кг °С;

$t_{\text{н}}$ – температура нагретого навоза (температура брожения), °С;

$t_{\text{к}}$ – температура исходного сырья, °С.

$$Q_2 = B_{\text{н}} \cdot C_p \cdot \Delta t. \quad (2.40)$$

Здесь Δt – допустимое падение температуры в метантенке за счет тепловых потерь, °С.

Пример энергетического расчета биогазовой установки

Рассчитать количество произведенной тепловой и электрической энергии для установки, производительность которой по исходному сырью влажностью 90 % составляет 160 м³/сут., по биогазу – 2500 м³/сут. Температура брожения – 42 °С, температура исходного сырья – 10 °С. Установка имеет 2 метантенка, рабочий объем каждого из них (V_p) составляет 500 м³. Определим часовую производительность установки по биогазу:

$$2500 : 24 = 104,16 \text{ м}^3/\text{ч},$$

что соответствует расходу природного газа:

$$104,16 \times 25 : 33 = 76,58 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где 25 МДж/м³ и 33 МДж/м³ – объемная теплота сгорания биогаза и природного газа соответственно.

Вариант I. Биогаз используется только для производства тепловой энергии (например, для отопления нагревательного блока БГВ-50).

- суточное потребление природного газа одним блоком составит:

$$5,43 \text{ м}^3/\text{ч} \times 24 = 130,32 \text{ м}^3/\text{сут.};$$

где 5,43 м³/ч – максимальный расход природного газа в блоке БГВ-50

- количество используемых котлов:

$$(76,58 \times 24) : 130,32 = 14,53 \text{ шт};$$

- количество произведенного тепла составит:

$$50 \times 14,53 = 726,5 \text{ кВт} = 20,27 \text{ Гкал/сут};$$

где 50 – номинальная тепловая мощность агрегата, кВт

- количество тепла, необходимое для нагрева дозы суточной загрузки сырья от начальной температуры 10 °С до температуры брожения:

$$Q_1 = B_n c_p (t_k - t_n) = 160 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot (42 - 10) = 5120 \cdot 10^3 \text{ ккал/сут} = 5,12 \text{ Гкал/сут};$$

где 1 – удельная теплоемкость жидкого навоза; при влажности сырья 90 % принимается равной теплоемкости воды, ккал / кг °С

- количество тепла, необходимое для компенсации тепловых потерь в метантенке при допустимом падении температуры 2 °С.

$$Q_2 = V_p c_p \Delta t = 500 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 2 = 1000 \cdot 10^3 \text{ ккал} = 1,0 \text{ Гкал/сут}, \text{ т.е. для}$$

компенсации тепловых потерь в двух метантенках необходимо затратить 2,0 Гкал/сут тепла;

- общие непроизводительные затраты тепла ($Q_1 + Q_2$) составят:

$$5,12 + 2,0 = 7,12 \text{ Гкал/сут};$$

- товарное тепло составит:

$$20,27 - 7,12 = 13,15 \text{ Гкал/сут или около } 64,8 \% \text{ от производимого тепла};$$

- при плотности теплового потока 45 Вт/м³ объем отапливаемого помещения составит:

$$13,15 \text{ Гкал/сут} = 13150000 \text{ ккал/сут} : 24 = 547917 \text{ ккал/ч} : 860 = 637 \text{ кВт} = 637000 \text{ Вт} : 45 \text{ Вт/м}^3 = 14158 \text{ м}^3,$$

где 860 – соотношение между кВт и ккал/ч.

При высоте потолков до 4 метров этого тепла достаточно для нагрева воздуха в помещении площадью 3539 м² до температуры 20 °С.

Вариант II. Биогаз используется для производства электрической и тепловой энергии в когенерационной установке типа G3408. Расчеты произведем, используя данные таблицы 2.22.

- время работы агрегата при расходе природного газа 82 м³/час :

$$76,58 : 82 = 0,934 \text{ ч};$$

- рабочий период в течение суток:

$$0,934 \times 24 = 22,4 \text{ ч};$$

- количество произведенной электрической энергии:
 $255 \times 22,4 = 5715 \text{ кВт/сут};$
- количество производимой тепловой энергии:
 $419 \times 22,4 = 9385,6 \text{ кВт/сут} \times 860 = 8071616 \text{ ккал/сут} = 8,07 \text{ Гкал/сут};$
- количество тепловой товарной энергии:
 $8,07 - 7,12 = 0,95 \text{ Гкал/сут}.$

2.5. Разделение сброженной массы

При разработке узла разделения сброженной массы необходимо учитывать следующие показатели работы установки:

- производительность по исходному сырью;
- доза разовой загрузки;
- степень разложения сухого органического вещества в метантенке;
- температура отферментированной массы;
- содержание удобрительных (N, P, K) элементов;
- значения ХПК, БПК;
- способы использования обезвоженного шлама и жидких стоков.

Эффективность работы узла разделения сброженной массы в значительной степени влияет на эффективность работы установки в целом, поэтому оборудование этого узла должно иметь максимально низкое энергопотребление; при этом коэффициент его использования должен быть максимально возможным.

В том случае, если предполагается рекуперация тепла жидкой фракции, устройство разделения сброженного навоза должно обеспечивать выделение этой фракции за короткое время, а соединительные трубопроводы должны быть теплоизолированы и иметь небольшую протяженность.

2.5.1. Характеристика сброженной массы

Сброженная масса, как и сырой навоз, обладает удобрительными свойствами. В нативном (исходном) навозе эти свойства обусловлены содержанием азота, фосфора, калия и других полезных элементов. Анализ системы «корм – животное – навоз» для КРС, показал, что в результате распределения удобрительных элементов в навоз уходит 82 % азота, 70 % фосфора и почти весь калий [55]. Во время брожения разлагается в сред-

нем 40 % органического вещества; при этом уменьшается содержание углерода и соответственно соотношение C : N. Фосфор, калий и азот полностью сохраняются в сброженном шламе; одновременно происходит минерализация азота и фосфора – основных компонентов удобрения. Это обеспечивает их лучшую сохранность. При анаэробной переработке в сброженном шламе в 4 раза увеличивается содержание аммонийного азота по сравнению с нативным навозом, а содержание усвояемого фосфора удваивается. В переброженном шламе практически отсутствует патогенная микрофлора и гельминты, утеряна всхожесть семян сорных трав [56]. В процессе метанового сбраживания образуются гуминовые кислоты, повышающие водоудерживающую способность сброженной массы и способность накапливать питательные вещества.

Сброженная масса по внешнему виду не отличается от исходного сырья. При метановом сбраживании количество отферментированной массы и количество загруженного исходного навоза практически не изменяется, так как химические реакции на различных стадиях сбраживания сопровождаются как поглощением воды (разложение органических кислот), так и ее выделением (реакция восстановления CO_2 до CH_4). Поэтому при проектировании узла разделения влажность сброженной массы принимают равной влажности сырья.

Изменение химического состава исходного сырья в процессе метанового сбраживания и его санитарно-гигиенические показатели по данным разных исследователей приводятся в табл. 2.23; 2.24; 2.25; 2.26.

Как видно из табл. 2.26, в сброженной массе обнаруживаются яйца гельминтов, оболочки которых не были разрушены даже при температуре 55 °C. Однако дальнейшее выдерживание этой массы в течение месяца не привело к развитию личинок, что свидетельствует о нежизнеспособности яиц гельминтов, содержащихся в отферментированном навозе. Отсутствие в сброженной массе патогенной микрофлоры также подтверждает эффективность обеззараживания навоза при термофильном сбраживании.

Согласно данным [20], при метановом сбраживании разлагается около 40 % органического вещества, по данным [17] этот показатель достигает 70 % в наиболее благоприятных условиях. Нашими исследованиями установлено, что степень разложения органического вещества в среднем со-

ставляет 30–40 %. При этом минеральные компоненты навоза переходят в более доступную для усваивания растениями форму, а фосфор и калий практически полностью сохраняются в сброженной массе.

Что касается соединений азота, то в результате сложных биохимических процессов, происходящих при метановом сбраживании, их общее количество уменьшается. Однако это уменьшение незначительно по сравнению с обычным хранением навоза. Если в результате десятимесячного выдерживания в отстойниках потери общего азота в навозе составляют около 20 %, то при метановом сбраживании – 1,5 – 3 %. Содержание калия при хранении навоза снижается на 26 %, фосфора – на 28 %, кальция – на 17 %, магния – на 28 %.

Таблица 2.23 – Изменения химического состава отходов свиноводческой фермы при 10–дневной анаэробной ферментации в термо- и мезофильном режиме [50]

Показатель	Исходное сырье	Мезофильный режим	Термофильный режим
Сухое вещество (с.в.), %	6	4,2	3,5
Органическое вещество, % с.в.	83,9	78,4	74,9
Общий азот, % с.в.	5,2	7,6	8,5
Химическая потребность в кислороде (ХПК) мл/л 10 ³	24	18	10
Лигнин, % с.в.	6,9	9,2	9,4
Целлюлоза, % с.в.	16,1	15,9	14,3
Уксусная кислота, мг/л	2,2	0,5	0,15
Пропионовая кислота, мг/л	1,7	1,8	1,6
Масляная кислота, мг/л	2,3	2,9	2,8

Таблица 2.24 – Состав и свойства отферментированного свиного навоза при термофильном режиме и времени сбраживания 5 суток [17]

Показатель	Период эксперимента	
	23.06.1982–20.11.1982	14.12.1982–11.04.1983
Водородный показатель	6,3–7,8	7,2–8,1
ЛЖК, мг/кг	605–1065	411–1004
Сухое вещество, %	3,3–7,7	3,8–6,1
Органическое вещество, %	4,1–5,3	2,9–4,9

Содержание Р, %	0,1–0,2	0,2–0,4
Содержание Са, %	0,3–0,8	0,2–0,6
Содержание Mg, %	0,06–0,24	0,07–0,2
Содержание Fe, мг/кг	26,8–425	176–364
Содержание N общ., %	0,4–1,0	0,2–1,2

Таблица 2.25 – Состав и свойства отферментированного навоза КРС при 10-суточном сбраживании при температуре 40 °С [6]

Показатели	Исходное сырье	После сбраживания
Влажность	93,2–96,3	92,2–98,2
Водородный показатель	7,2–8	7,6–8
Объемная масса, кг/м ³	1000–1100	1000–1116
Содержание взвешенных частиц, мг/л	22800–60800	18667–69800
Средневзвешенный размер частиц, мм	3,9–6,69	2,1
Содержание азота. %		
аммиачного	0,1	0,115
общего	0,19	0,13
Содержание Р, %	0,096	0,09
Содержание К, %	0,26	0,26
Содержание С, %	2,18	1,4
Отношение С/Н	11,5	10,8
Общая микробная обсемененность, шт./мл	$6,75 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$
Коли-титр	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
Жизнеспособность яиц гельминтов, %	95,3	14
Всхожесть семян сорных растений, %	6,6	0
Степень разложения органич. вещ-ва, %	–	34–60

Таблица 2.26 – Результаты бактериологических исследований, проведенных на установке «Биогаз-301» при температуре ферментации 52–55 °С и времени сбраживания 10 суток

Показатель	Исходный навоз	Сброженная масса
Общая микробная обсемененность, шт./мл	$(4,9 - 8,4) \cdot 10^9$	$(1,4 - 1,6) \cdot 10^4$
Коли-титр	менее 0,00004	менее 0,04
Коли-индекс	$(1,9 - 2,6) \cdot 10^{10}$	$(1,8 - 2,6) \cdot 10^7$
Содержание патогенной микрофлоры (шигеллы, сальмонеллы)	не обнаружено	не обнаружено
Стафилококк	не обнаружено	не обнаружено

Энтеропатогенная палочка	не обнаружено	не обнаружено
Гельминты:		
фасциолы	5 шт. в преп. – 100 яиц в 1л	4 шт. в преп. – нежизнеспособны
аскариды	5 шт. в преп. – 100 яиц в 1л	2 шт. в преп. – нежизнеспособны

Отферментированная масса, полученная на установках малой производительности, может непосредственно использоваться в качестве удобрения; на крупных установках ее целесообразно разделять на твердую и жидкую фракции.

2.5.2. Использование сброженной массы без разделения

Многие исследователи указывают на преимущества использования сброженной массы в качестве удобрений по сравнению с навозом штабельного хранения. В совхозе "Огре" (Латвия) было проведено сравнение удобрительных свойств навозных стоков свинофермы, переработанных на биогазовой установке, и навоза штабельного хранения. В опытах на тепличных культурах редиса, помидоров и салатов при равных дозах внесенного азота во всех случаях выявлено увеличение урожая (от 7 до 64 %) при использовании сброженного шлама [17]. Было также установлено, что при использовании переработанных стоков вместо минеральных удобрений содержание нитратного азота в тепличных овощах уменьшается в 5 раз при одинаковых дозах внесенного азота и одинаковой урожайности культур (табл. 2.27). Оценивалась также эффективность внесения сброженной массы под пастбищные культуры, кукурузу, картофель. Полученные результаты (табл. 2.28, 2.29) подтверждают преимущество использования переработанных стоков перед минеральными удобрениями и навозом штабельного хранения.

Таблица 2.27 – Содержание нитратного азота в урожае в зависимости от вида удобрений

Вид удобрения	Содержание нитратов, мг/кг
Комплексные минеральные удобрения	1933,7–1978,9

Переброженные навозные стоки	343,7–360,2
------------------------------	-------------

Таблица 2.28 – Результаты исследований агрохимических качеств сброженного навоза [17]

Вид удобрения	Картофель летней посадки		Картофель весенней посадки		Кукуруза			
					Общая масса		Початки	
	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
Контроль (без удобрений)	213	100	122,9	100	236,5	100	59,0	100
Навоз штабельного хранения	214	100,5	152,8	124,4	307,0	125,8	76,0	128,8
Навоз сброженный	237	111,3	166,3	135,3	356,1	149,0	88,0	149,2
Навоз + Р, К	–	–	137,6	111,9	293,0	123,4	60,5	102,5
Навоз сброженный + Р, К	236	110,8	175,8	143,0	304,5	128,7	84,5	143,2
Полные минеральные удобрения + Р, К	207	97,2	164,2	133,9	293,0	123,4	83,7	141,8

Таблица 2.29 – Влияние вида удобрения на урожайность сельскохозяйственных культур

Вид удобрения	Общий урожай, ц/га
Травы (за 3 укоса) – без удобрений	120
Минеральные удобрения N190P70K100 (N – 190 кг/га; Р – 70 кг/га; К – 100 кг/га)	295
Переработанные свиные стоки, осенью полив 2 раза, после первого выпаса – 2 раза, после второго выпаса 2 раза	530
Кукуруза (за 1 укос) – без удобрений	110
Переработанные свиные стоки – норма внесения 130 т/га	

+ калийные удобрения	240
Травы культивированных пастбищ (за 4 укоса) – без удобрений	202
Переброженный шлам весной	334

2.5.3. Оборудование для разделения сброженной массы

К основному оборудованию для разделения отферментированной массы относятся специальные разделительные устройства и сборники-накопители. В сборниках-накопителях производится аэрирование сброженной массы; происходящие при этом окислительно-восстановительные процессы приводят к дальнейшему снижению ХПК и БПК массы и улучшению ее санитарно-гигиенических показателей.

Для разделения отферментированной массы могут использоваться гравитационный, динамический, центробежный, флотационный методы и их различные комбинации. Разделение гравитационным методом осуществляется в вертикальных и горизонтальных отстойниках.

Динамический метод разделения основан на использовании дуговых сит и виброгрохотов. Эффективность выделения твердой фракции навоза, содержащего 2–4 % взвешенного вещества, на виброгрохотах ГИП-32 и ГИП-52 с размером ячеек сит $0,35 \times 0,35$ мм при удельной нагрузке 8–12 м³/м²·ч достигает 45–50 %. При этом влажность выделенной твердой фракции составляет около 70 %. Однако виброгрохоты довольно громоздки и неудобны в обслуживании.

Дуговые сита просты по конструкции, надежны в работе и малоэнергоёмки. Их производительность может достигать 80 м³/ч при разделении субстрата влажностью 98–99 % и 40 м³/ч при влажности 94–95 %.

Довольно широкое распространение в технике разделения грубых суспензий, к которым относится и отферментированная масса, получили центрифуги различных конструкций. В частности, находят применение фильтровальные центрифуги, в которых разделение сброженной массы осуществляется путем фильтрования через перфорированную перегородку. Однако их недостатком является быстрый износ и забивание фильтровального элемента.

На установке «Биогаз-301С» для разделения отферментированного свиного навоза была опробована серийно изготавливаемая осадительная центрифуга типа ОГШ, преимуществом которой являются высокая производительность при небольших габаритах, непрерывность действия, простота в обслуживании. Устройство машины показано на рис. 2.43 [57]. Основным конструктивным признаком центрифуг типа ОГШ – горизонтальное расположение оси неперфорированного конического или цилиндро-конического ротора 9 с соосно расположенным внутри него шнеком 8. Ротор и шнек вращаются в одном направлении, но с различными скоростями. Загрузка отферментированной массы осуществляется через питающую трубу 4; затем через окна обечайки шнека обрабатываемое сырье поступает в полость ротора. Под действием центробежной силы происходит разделение отферментированной массы, и на стенках ротора осаждаются частицы твердой фракции. Осадок транспортируется шнеком к выгрузочным окнам 2 и далее через штуцер 10 – на транспортер. Фугат (жидкая фракция) течет в противоположном направлении, к сливным окнам 5 и далее через штуцер 7 – в сборник жидкой фракции.

В процессе эксплуатации было установлено, что для такого субстрата, как сброженная масса, содержащая большое количество взвешенных веществ, необходима доработка конструкции серийной центрифуги ОГШ, а именно – расширение выгрузочных окон 2.

Центрифуга ОГШ500К1 после доработки длительное время эксплуатировалась в составе установки «Биогаз 301С», обеспечивая влажность обезвоженного шлама 65–70 % и содержание взвешенных веществ в фугате 0,1–1 %.

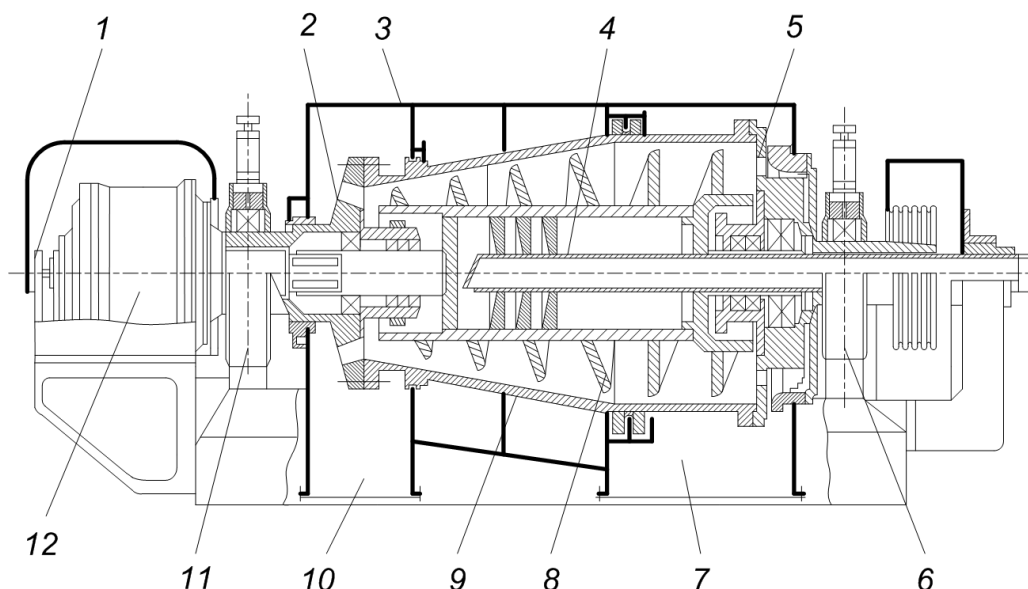


Рисунок 2.43 – Схема центрифуги типа ОГШ: 1 – защитное устройство редуктора; 2, 5 – окна выгрузки осадка и слива фугата; 3 – кожух; 4 – питающая труба; 6, 11 – опоры; 7, 10 – штуцеры отвода фугата и выгрузки осадка; 8 – шнек; 9 – ротор; 12 – планетарный редуктор

Принципиальная схема узла разделения сброженной биомассы показана на рис. 2.44. Отферментированная масса из метантенка поступает в сборник 1 через штуцер 2. Содержимое сборника перед подачей на центрифугу 3 необходимо тщательно перемешать, так как стабильная работа центрифуги возможна только при переработке однородного субстрата.

Перемешивание в сборнике может осуществляться следующими способами:

- механическим – с использованием лопастной мешалки;
- гидравлическим – перекачиванием отферментированной массы путем ее отбора из днища (штуцер 5) и подачи в сборник через крышку (штуцер 6);
- пневматическим – продувкой воздухом с использованием газодувки 7 и барботажного устройства 8.

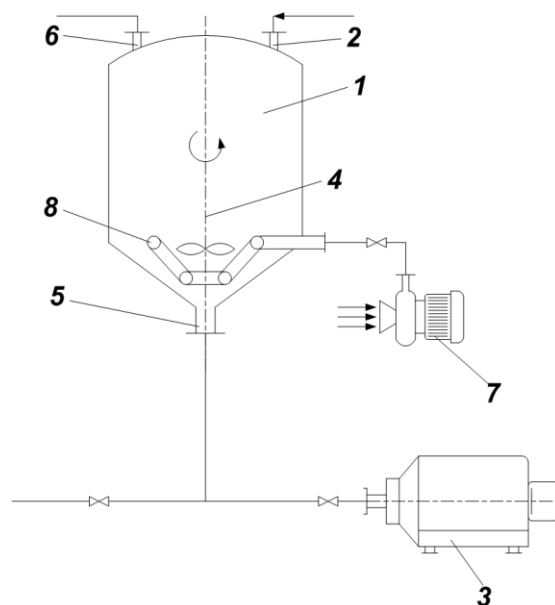


Рисунок 2.44 – Принципиальная схема узла разделения сброженной массы: 1 – сборник отферментированной массы; 2, 5, 6 – штуцеры; 3 – центрифуга; 4 – перемешивающее устройство; 7 – воздуходувка; 8 – барботажное устройство

Широкое применение для разделения сброженной массы нашли сепараторы различных типов. На свиноводческих комплексах стран СНГ длительное время эксплуатируются низкооборотные сепараторы. Основу конструкции этих устройств составляет перфорированный барабан, установленный на раме и вращающийся со скоростью 25–30 об/мин.

На вибросепараторах шведской фирмы «Альфа-Лаваль» разделение навоза осуществляется при прохождении суспензии сквозь колеблющиеся вертикальные и горизонтальные поверхности. Используются также сепараторы, работающие по принципу отжима жидкости из навоза с помощью пневматических валиков, размещенных на вращающемся сите. При этом влажность твердой фракции составляет 75–80 %.

Широко используются вакуумные барабанные фильтры, барабанные щеточные сита с пресс-валиками, ленточные фильтр-прессы, шнековые прессы или сочетание двух различных устройств, как это показано на рис. 2.45.

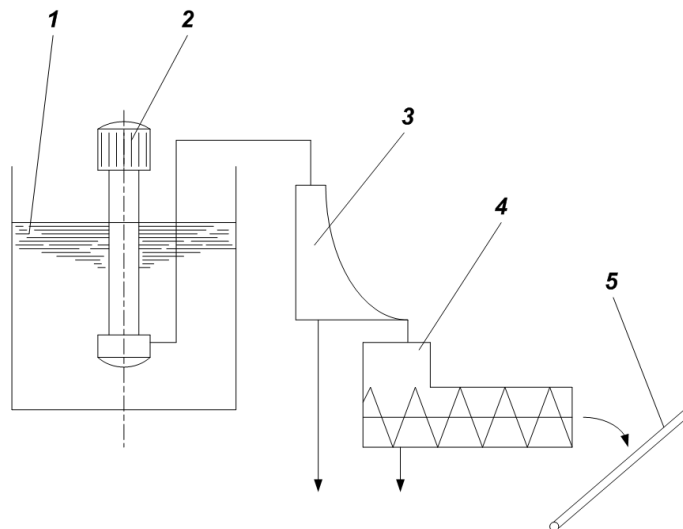


Рисунок 2.45 – Схема разделения отферментированной массы с использованием различных устройств: 1 – сборник массы; 2 – фекальный погружной насос; 3 – дуговое сито; 4 – пресс-фильтр; 5 – транспортер твердой фракции

2.6. Сбор и использование продуктов разделения сброженной массы

Свойства продуктов разделения отферментированной массы (обезвоженного шлама и жидких стоков) и эффективность их использования зависят от качества исходного сырья, принятой технологии сбраживания и технологии разделения сброженного субстрата.

Обезвоженный шлам представляет собой сыпучую гранулированную массу, состоящую из простых и сложных органических веществ и минеральных солей. Влажность обезвоженного шлама колеблется от 65 до 75 %; срок его хранения составляет около трех месяцев; шлам, высушенный до влажности 20 %, может храниться в течение года.

Жидкие стоки (жидкая фракция) содержат 0,8–1,0 % твердого вещества. В табл. 2.30 приведен состав твердой и жидкой фракций, полученных на установке «Биогаз 301С» в сравнении с исходным навозом. Как видно из приведенных данных, концентрация биогенных элементов в сырье и сброженной массе может значительно колебаться. Основное влияние на состав твердой и жидкой фракций оказывает химический состав экскрементов, который, в свою очередь, зависит от кормового рациона и качества кормов животных, а также их физиологического состояния, наличия тех или иных заболеваний, влияющих на переваривание и усвоение пищи.

Таблица 2.30 – Состав исходного навоза, твердой и жидкой фракций сброженной массы, %

Субстрат	Вода	Сухое вещество	N	P	K
Исходный свиной навоз	93	7,0	0,07–0,18	0,02–0,07	0,09–0,28
Жидкая фракция после сбраживания	98–99	1–2	0,1–0,18	0,04–0,08	0,11–0,12
Твердая фракция после сбраживания	65–68	32–35	0,74–0,89	0,6–1,35	0,16–0,19

Производительность установки по обезвоженному шламу и жидким стокам зависит от содержания сухого вещества в исходном сырье.

Количество обезвоженного шлама ($B_{\text{ш}}$) можно определить по формуле

$$B_{\phi} = \frac{\dot{I}_{\text{н.а}} \cdot 100}{100 - \tilde{O}_{\phi}}, \quad (2.41)$$

где $M_{\text{с.в}}$ – масса сухого вещества отферментированных стоков, т/сут;

$X_{\text{ш}}$ – влажность шлама, %

$$\dot{I}_{\text{н.а}} = \frac{\hat{A}_i \cdot (100 - \tilde{O}_0)}{100}, \quad (2.42)$$

где $B_{\text{н}}$ – производительность установки по исходному сырью, т/сут;

X_0 – влажность отферментированной массы, %

Производительность установки по жидким стокам ($B_{\text{с}}$)

$$B_{\text{н}} = B_i - B_{\phi} \quad (2.43)$$

Пример: Определить производительность установки по обезвоженному шламу и жидким стокам, если устройство для разделения сброженной массы имеет производительность 10 м³/ч и обеспечивает влажность шлама 65 %, а содержание сухого вещества в фугате – 0,8 %. Доза суточной загрузки установки по исходному сырью – 190 м³/сут, влажность сырья – 90 %, степень разложения органического вещества – 40 %.

1. Определим содержание сухого вещества в исходном сырье:

$$\dot{I}_{\text{н.â}} = \frac{\hat{A}_I \cdot (100 - \tilde{O})}{100} = \frac{190 \cdot 1 \cdot (100 - 90)}{100} = 19 \text{ т} = 19000 \text{ кг};$$

где X – влажность исходного сырья, %.

2. С учетом степени разложения органического вещества (40 %) в сброженной массе останется органического вещества: $19000 \cdot 0,6 = 11400 \text{ кг}$.

3. Если в жидкую фракцию (фугат) перейдет 0,8 % сухого вещества, то в обезвоженном шламе останется сухого вещества:

$$11400 \cdot (100 - 0,8)/100 = 11308 \text{ кг}.$$

4. При влажности шлама 65 % его количество составит:

$$11308 \cdot 100/(100 - 65) = 32308,5 \text{ кг} = 32,308 \text{ т/сут}.$$

5. Количество жидких стоков: $190 - 32,308 = 157,69 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Возможные способы использования обезвоженного шлама и жидкой фракции отферментированной массы схематически показаны на рис. 2.46, 2.47.

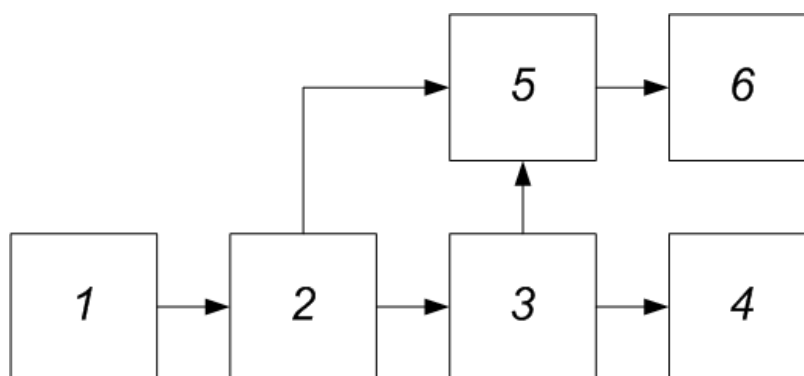


Рисунок 2.46 – Принципиальная технологическая схема сбора и использования обезвоженного шлама: 1 – устройство для разделения отферментированной массы; 2 – транспортирование шлама; 3 – бункер-наполнитель; 4 – переработка обезвоженного шлама в другие продукты; 5 – транспортное средство для вывоза на поля; 6 – внесение удобрений в почву

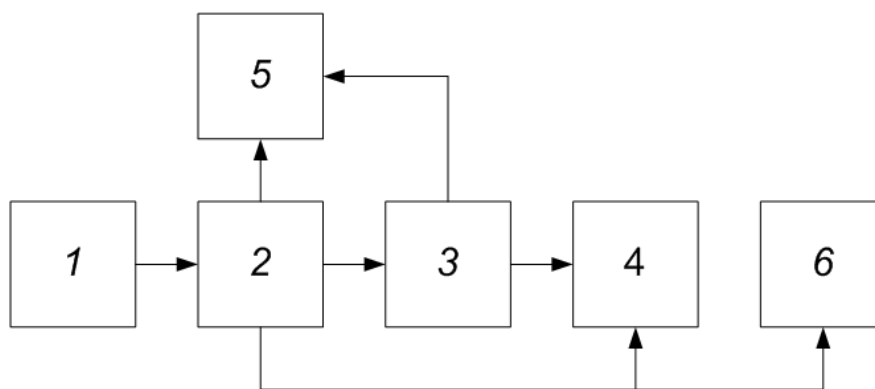


Рисунок 2.47 – Принципиальная технологическая схема сбора и использования жидких стоков: 1 – устройство для разделения отферментированной массы; 2 – сборник жидких стоков; 3 – рекуперация тепла жидких стоков; 4 – орошение полей; 5 – доочистка; 6 – производство жидких органо-минеральных удобрений

2.6.1 Использование обезвоженного илама и жидких стоков в качестве удобрений

Анализ работы действующих биогазовых установок показывает, что продукты ферментации используются, главным образом, как удобрения.

На полях Сумского НПО "Элита" в течение 1986–1989 гг. были проведены испытания удобрительных свойств сброженной массы, полученной установке «Биогаз 301С», на кормовых культурах (кормовая свекла и кукуруза на зеленую массу). При этом ставилась задача произвести сравнительную оценку удобрительных свойств сброженного навоза, минеральных удобрений и исходного свиного навоза. Минеральные удобрения (аммиачную селитру, суперфосфат простой гранулированный, калий хлористый) вносили в больших дозах для обеспечения высоких урожаев этих культур.

Исходный свиной навоз и жидкую фракцию сброженной массы применяли в дозах по 100, 200 и 300 т/га, твердую фракцию и стойловый навоз – в дозах 20, 40 и 60 т/га. Недостающие в органических удобрениях биогенные элементы (NPK) вводили с минеральными туками (табл. 2.31). Кроме того, изучали действие жидкой фракции сброженной массы без добавления минеральных удобрений при дозах внесения 200 и 300 т/га, а также твердой фракции без добавок в дозах 40 т/га под кукурузу на силос и 60 т/га под кормовую свеклу в сравнении со стойловым навозом.

Таблица 2.31 – Количество элементов питания, добавленных в соответствии со стандартом, к органическим удобрениям, кг/га, действующего вещества

№ опыта	Удобрения, доза внесения	Под кукурузу			Под кормовую свеклу		
		N	P	K	N	P	K
1	Без удобрений – контроль	–	–	–	–	–	–
2	Минеральные удобрения	150	120	120	180	180	180
3	Исходный навоз 100 т/га	88	95	90	118	155	150
4	Твердая фракция 20 т/га	–	–	82	30	60	142
5	Стойловый навоз 20 т/га	50	70	–	80	100	30
6	Твердая фракция 40 и 60 т/га	–	–	–	–	–	–
7	Стойловый навоз 40 и 60 т/га	–	–	–	–	–	–
8	Жидкая фракция 100 т/га	–	75	–	30	135	60
9	Жидкая фракция 200 т/га	–	–	–	–	–	–
10	Жидкая фракция 300 т/га	–	–	–	–	–	–

Исследования проводились на типичных малогумусных черноземах среднесуглинистого механического состава, которые занимают свыше половины пашни Сумской области и около 4,5 млн га пахотных земель Украины. Почва земельного участка характеризуется следующими агрономическими показателями: содержание гумуса по Тюрину 4,1 %, pH солевой вытяжки 6,6; гидролитическая кислотность и поглощение Са и N соответственно 2,3 и 32,0 мг-экв/100 г почвы; содержание подвижных форм фосфора и калия по Чирикову 11,4 и 7,6 мг/100 г почвы.

Результаты испытаний показали (табл. 2.32), что в условиях 1986 г для силосной кукурузы лучшими были минеральные удобрения, которые обеспечили прирост урожая на 159 ц/га (37,5 %) по сравнению с контролем.

Наиболее близким к этому результату был исходный свиной навоз, при внесении которого получен дополнительный урожай 138 ц/га (32,5 %). От внесения жидкой фракции получена прибавка в урожае 100 ц/га (23,6 %). Наименьший эффект получен при внесении твердой фракции –

45 ц/га (10,6 %). Относительно низкая эффективность органических удобрений по сравнению с минеральными объясняется засушливой погодой 1986 года: недостаток влаги препятствовал минерализации органических веществ навоза.

Таблица 2.32 – Влияние удобрений на урожайность силосной кукурузы (1986 г), ц/га

№ опыта	Удобрения	Проба				Среднее
		I	II	III	IV	
1	Без удобрений – контроль	422	436	406	432	424
2	N150 P120 K120 – стандарт	579	584	586	583	583
3	Исходный навоз 100 т/га + N, P, K до стандарта	574	573	569	531	562
4	Жидкая фракция 100 т/га + N, P, K до стандарта	531	522	523	520	524
5	Твердая фракция 100 т/га + N, P, K до стандарта	477	461	473	466	469

Более эффективными оказались все виды удобрений, внесенные под кормовую свеклу (табл. 2.33). Здесь как абсолютные, так и относительные прибавки в урожае были выше, чем под силосную кукурузу. Это обусловлено тем, что основной прирост массы этой культуры происходит во второй половине лета и осенью, когда влаги в почве достаточно много. В этом случае эффективность минеральных удобрений и исходного жидкого свиного навоза была одинаковой (прибавки 265 и 252 ц/га соответственно), а жидкая фракция превосходила действие минеральных удобрений (прибавка 326 ц/га). Как и в случае с кукурузой, твердая фракция сброженной массы, имеющая невысокую собственную влажность, оказалась наименее эффективной ввиду недостатка влаги для минерализации органических веществ в период вегетации культуры.

Таблица 2.33 – Влияние удобрений на урожайность кормовой свеклы, ц/га

№ опыта	Удобрения	Проба				Среднее
		I	II	III	IV	
1	Без удобрений – контроль	546	532	558	560	549
2	N150 P120 K120 – стандарт	794	786	836	840	814
3	Исходный навоз 100 т/га + N, P, K до стандарта	786	824	815	779	801
4	Жидкая фракция 100 т/га + N, P, K до стандарта	908	895	856	841	875
5	Твердая фракция 100 т/га + N, P, K до стандарта	749	698	750	711	727

В 1987 году количество атмосферных осадков в период вегетации кукурузы и кормовой свеклы было достаточным. В этих условиях использование минеральных удобрений, исходного свиного навоза и жидкой фракции дали практически одинаковый прирост урожайности по отношению к контролю, соответственно: на 156 ц/га (29,1 %); 146 ц/га (27,2 %) и 163 ц/га (30,4 %) (табл. 2.34).

Несколько менее эффективным было действие твердой фракции – урожайность увеличилась на 107 ц/га (20,1 %) по сравнению с контролем, однако этот показатель существенно выше, чем для 1986 г.

Таблица 2.34 – Влияние удобрений на урожайность зеленой массы кукурузы, ц/га

№ опыта	Удобрения	Проба				Среднее	Прибавка
		I	II	III	IV		
1	Без удобрений – контроль	564	557	513	512	536	–
2	N150 P120 K120 – стандарт	670	793	647	656	692	156
3	Исходный навоз 100 т/га – N88 P95 K90	677	722	656	675	682	146
4	Твердая фракция 20 т/га + K88	554	648	620	650	643	107
	Жидкая фракция 100 т/га + P75	669	797	693	636	699	163
6	Жидкая фракция 200 т/га	673	795	692	644	701	165
7	Жидкая фракция 300 т/га	702	783	669	653	702	166

При использовании жидкой фракции в дозах 200 и 300 т/га без добавления минеральных удобрений получен такой же урожай зеленой массы кукурузы, что и при дозе 100 т/га с добавкой биогенных элементов (NPK) до показателей стандарта. Данные по урожайности корней кормовой свеклы (табл. 2.35) показывают, что все виды удобрений, внесенные под эту культуру, оказались более эффективными, чем под кукурузу на силос. Это обусловлено тем, что основной прирост урожайности этой культуры, имеющей более продолжительный вегетативный период, чем кукуруза, происходит во второй половине лета и поздней осенью, когда большая часть питательных веществ органических удобрений минерализована и доступна для растений. В нормальном с точки зрения влажности почвы 1987 году все виды удобрений, включая твердую фракцию, оказывали одинаковое влияние на урожайность кормовой свеклы. Жидкая фракция при внесении в дозе 200 т/га без компенсации минеральными удобрениями дает такой же урожай, как и в дозе 100 т/га с добавкой биогенных элементов (NPK) до показателей стандарта. При внесении этого же удобрения в чистом виде в дозе 300 т/га урожайность кормовой свеклы возрастает.

Таблица 2.35 – Влияние удобрений на урожайность кормовой свеклы, ц/га

№ опыта	Удобрения	Проба				Среднее	Прибавка	
		I	II	III	IV		ц/га	%
1	Без удобрений – контроль	640	621	650	630	635	–	–
2	N180 P180 K180	806	816	854	843	830	195	30,7
3	Исходный навоз 100 т/га + N118 P155 K150	862	837	851	878	857	222	35,0
4	Твердая фракция 200 т/га + N30 P60 K142	862	810	834	826	833	198	31,2
5	Жидкая фракция 100 т/га + N30 P135 K60	835	859	862	817	843	208	32,8
6	Жидкая фракция 200 т/га	865	812	816	856	837	202	31,8
7	Жидкая фракция 300 т/га	856	895	910	860	880	245	38,6

Качество кормовых культур, выращенных в 1986–1987 гг., оценивалось по содержанию нитратов и выходу кормовых единиц. Содержание нитратов в продукции (табл. 2.36) зависело от видов и доз удобрений, фазы развития и органа растения (ботва, корни, стебли и др.) В метелке кукурузы, в фазе ее цветения, меньше всего нитратов было в растениях контрольного варианта (169 мг/кг). При внесении же удобрений содержание нитратов резко возрастает и существенно превышает предельно-допустимую норму (200 мг/кг) за исключением варианта 4, когда вносили твердую фракцию – здесь содержание нитратов сопоставимо с нормой (258 мг/кг). Исходный навоз и жидкая фракция, приближенные к стандарту по количеству питательных веществ, обуславливают такое же содержание нитратов в растениях, что и минеральные удобрения. Больше всего нитратов в продукции накапливается при применении высоких доз жидкой фракции.

В фазе молочно-восковой спелости, когда идет уборка кукурузы на силос, содержание нитратов в растениях снижается и, в большинстве случаев приближается к показателю контрольного варианта. Только при применении высоких доз жидкой фракции (200 и 300 т/га) содержание нитратов в растениях заметно возрастает – 346 кг/кг и 431 кг/кг, контроль – 300 мг/кг.

Таблица 2.36 – Содержание нитратов в продукции, мг/кг

№ опыта	Удобрения	Кукуруза		Кормовая свекла	
		цветение метелки	МВС*	ботва	корни
1	Без удобрений	169	300	800	716
2	N P K	489	292	815	1615
3	Свиной навоз 100 т/га + N P K	427	284	807	1666
4	Твердая фракция 20 т/га + N P K	258	236	808	1200
5	Жидкая фракция 100 т/га + N P K	476	313	791	1352
6	Жидкая фракция 200 т/га	594	346	803	1610
7	Жидкая фракция 300 т/га	–	431	817	1864

*МВС – молочно-восковая спелость

В момент уборки кормовой свеклы в ботве во всех вариантах содержится равное количество нитратов. Количество нитратов в корнях зависит

от вида внесенных удобрений. Если без внесения удобрений в корнях содержится 716 мг нитратов на килограмм сырой массы (норма не должна превышать 800 мг/кг), то при внесении минеральных удобрений и исходного навоза содержание нитратов превышает норму более чем в два раза. При использовании твердой и жидкой фракций сброженной массы содержание нитратов в растениях на 25 % меньше. Несколько повышается количество нитратов в корнях с ростом доз внесения жидкой фракции.

Выход кормовых единиц указан в табл. 2.37, из которой видно влияние удобрений на продуктивность растений по каждому из вариантов.

В контрольном опыте (вар. № 1, без внесения удобрений) в фазе цветения метелки кукурузы продуктивность культуры за счет естественного плодородия почвы составила 34,4 ц/га кормовые единицы. Внесение удобрений способствовало существенному росту выхода продукции с гектара – от 15,5 до 33,0 к.е./га в зависимости от вида удобрения. Прирост продуктивности за счет внесения минеральных удобрений составил 15,5 к.е. (45,1 %) по сравнению с контролем, а внесение 100 т/га жидкой фракции, обогащенной биогенными элементами (NPK), обеспечивало прирост выхода кормовых единиц на 32,7 к.е. (95,1 %).

Таблица 2.37 – Выход кормовых единиц, ц/га

№ опыта	Кукуруза		Кормовая свекла		
	цветение метелки	МВС	корни	ботва	корни + ботва
1	34,4	107,2	114,3	22,9	137,2
2	49,9	138,4	149,4	24,9	174,3
3	54,6	150,0	171,4	25,7	197,1
4	51,4	135,0	166,6	27,5	194,1
5	67,1	160,8	168,6	30,3	198,9
6	67,3	154,2	150,7	27,6	178,3
7	67,4	168,5	158,4	26,4	184,8

Аналогичное влияние удобрений обнаруживается и в фазе молочно-восковой спелости кукурузы: за 35 дней развития культуры (от фазы цветения метелки до фазы молочно-восковой спелости) выход кормовых единиц почти утроился.

В 1988 году летняя температура воздуха и количество атмосферных

осадков были значительно выше многолетних показателей, и это благоприятно повлияло на рост кукурузы. Однако вследствие шквального ветра с ливнем и градом 21 июля растения полегли, что сказалось на формировании урожая. В результате абсолютные показатели урожайности кукурузы в фазе молочно-восковой спелости оказались ниже, чем в 1987 г (табл. 2.38).

Тем не менее удобрения оказали положительное влияние на продуктивность растений. При этом наибольший рост урожайности по отношению к контролю достигнут при использовании исходного навоза, жидкой фракции, обогащенной биогенными элементами (NPK) до показателей стандарта и жидкой фракции в дозе 300 т/га без добавления минеральных удобрений.

Таблица 2.38 – Влияние удобрений на урожайность зеленой массы кукурузы в фазе молочно-восковой спелости, ц/га

№ опыта	Удобрения	Проба				Среднее	Прибавка ц/га
		I	II	III	IV		
1	Без удобрений – контроль	361	315	388	372	359	–
2	N150 P120 K120 – стандарт	484	454	491	416	461	102
3	Исходный навоз 100 т/га + N88 P95 K90	541	504	470	537	513	154
4	Твердая фракция 20 т/га + K82	461	477	438	465	460	101
5	Стойловый навоз 20 т/га + N50 P70	482	447	445	422	449	90
6	Твердая фракция 40 т/га	452	508	462	428	462	103
7	Стойловый навоз 40 т/га	445	486	457	494	470	111
8	Жидкая фракция 100 т/га + P75	563	515	590	538	551	192
9	Жидкая фракция 200 т/га	525	510	518	503	514	155
10	Жидкая фракция 300 т/га	547	538	574	513	548	184

Прирост урожайности против контроля составил соответственно 154, 192 и 184 ц/га, что выше стандарта соответственно на 52,0, 90 и 82 ц/га. Однако отмечено, что внесение высокой дозы жидкой фракции (300 т/га) привело к превышению нормы содержания нитратов в продукте. Высокий урожай достигнут также при применении жидкой фракции в дозе 200 т/га без добавления минеральных удобрений – прирост урожайности против контроля составил 155 ц/га, что выше стандарта на 53 ц/га. Из табл. 2.39 видно, что в 1988 году удобрения благотворно влияли и на рост кормовой свеклы. Абсолютные прибавки урожая за счет применения удобрений были выше, чем для кукурузы. Это, как указывалось ранее, связано с особенностями роста корней свеклы, который происходит, в основном, в «мокрое» время года – во второй половине лета и осенью. Наименьший прирост урожая свеклы получен при использовании минеральных удобрений в чистом виде – прибавка 175 ц/га (26,4 %), а также при внесении твердой фракции сброженного навоза в дозе 60 т/га – прибавка 216 ц/га (32,5 %). Наивысшие урожаи получены при сочетании исходного навоза с минеральными удобрениями (932 ц/га) и жидкой фракции с минеральными удобрениями (990 ц/га) Это превышает контроль на 269 и 327 ц/га, а стандарт – на 94 и 152 ц/га соответственно. Следует отметить, что применение жидкой фракции в дозе 200 т/га в чистом виде обеспечивает такой же урожай, что и в дозе 100 т/га с добавкой биогенных элементов (NPK) до показателей стандарта. При внесении жидкой фракции в дозе 300 т/га прироста урожайности по сравнению с предыдущими вариантами не наблюдалось; в то же время отмечено увеличение концентрации нитратов в корнях свеклы.

Содержание нитратов в продукции приведено в табл. 2.40, 2.41. В условиях 1988 года в зеленой массе кукурузы в большинстве случаев содержание нитратов не превышало предельно-допустимую концентрацию (200 мг/кг).

Таблица 2.39 – Влияние удобрений на урожайность свеклы, ц/га

№ вар.	Удобрения	Проба				Среднее	Прибавка ц/га
		I	II	III	IV		
1.	Без удобрений – контроль	694	669	653	636	663	–
2.	N180 P180 K180 – стандарт	789	850	878	833	838	175
3.	Исходный навоз 100 т/га + N118 P155 K150	972	825	1008	922	932	269
4.	Твердая фракция 20 т/га + N30 P60 K142	831	875	931	933	892	229
5.	Стойловый навоз 20 т/га + N80 P100 K30	956	944	969	1000	967	301
6.	Твердая фракция 60 т/га	833	886	850	947	879	216
7.	Стойловый навоз 60 т/га	936	897	950	911	924	261
8.	Жидкая фракция 100 т/га + N30 P135 K60	1078	900	994	987	990	327
9.	Жидкая фракция 200 т/га	1053	942	1028	1044	1017	354
10.	Жидкая фракция 300 т/га	1011	997	958	1022	997	334

Только при использовании жидкой фракции в качестве удобрения в фазе молочной спелости количество нитратов в продукции превышало норму, хотя уже при уборке кукурузы на силос (фаза молочно-восковой спелости) содержание в ней нитратов было ниже предельно-допустимой концентрации.

Таблица 2.40 – Содержание нитратов в зеленой массе кукурузы, мг/кг

№ варианта	Удобрения	Фазы развития	
		молочная спелость	МВС
1.	Без удобрений – контроль	39,8	74,1
2.	N150 P120 K120 – стандарт	128,8	98,3
3.	Исходный навоз 100 т/га + N88 P95 K90	63,1	102,8
4.	Твердая фракция 20 т/га + K82	46,8	143,6
5.	Стойловый навоз 20 т/га + N50 P70	45,9	135,4
6.	Твердая фракция 40 т/га	69,2	137,6
7.	Стойловый навоз 40 т/га	126,0	119,2
8.	Жидкая фракция 100 т/га + P75	457,0	175,0
9.	Жидкая фракция 200 т/га	475,0	119,0
10.	Жидкая фракция 300 т/га	851,0	140,5

Таблица 2.41 – Содержание нитратов в кормовой свекле, мг/кг

№ вар.	Удобрения	Ботва	Корни
1.	Без удобрений – контроль	562	465
2.	N180 P180 K180 – стандарт	603	1606
3.	Исходный навоз 100 т/га + N118 P155 K150	1288	1802
4.	Твердая фракция 20 т/га + N30 P60 K142	537	1191
5.	Стойловый навоз 20 т/га + N80 P100 K30	898	1061
6.	Твердая фракция 60 т/га	613	787
7.	Стойловый навоз 60 т/га	661	863
8.	Жидкая фракция 100 т/га + N30 P135 K60	692	1534
9.	Жидкая фракция 200 т/га	1820	1111
10.	Жидкая фракция 300 т/га	1537	1534

Летом 1988 года, в вегетативный период роста кукурузы, погода была теплее обычной, что способствовало активному переходу запасного азота, накопленного в почве в нитратной форме, в белковые клетки растения. Поэтому к моменту уборки урожая в зеленой массе кукурузы оставалось небольшое количество нитратов. В корнях кормовой свеклы количество нитратов в подавляющем большинстве случаев превышало допустимые нормы (800 мг/кг). Только в опытах без внесения удобрений или при внесении твердой фракции сброженной массы в корнях содержалось допустимое количество нитратов. В остальных случаях концентрация нитратов превысила норму в 1,5– 2 раза.

Сбор кормовых единиц с гектара в 1988 г. показан в табл. 2.42.

В фазе молочной спелости кукурузы удобрения способствовали приросту выхода кормовых единиц в пределах 30 %. При этом разница в действии удобрений незначительна.

Таблица 2.42 – Влияние удобрений на выход кормовых единиц, ц/га

№ вар.	Кукуруза		Кормовая свекла		
	молочная спелость	молочно- восковая спелость	корни	ботва	корни + ботва
1.	45,0	93,3	79,6	15,9	95,5
2.	63,9	119,9	100,6	17,6	118,2
3.	67,7	133,4	111,8	19,6	131,4
4.	60,7	124,2	107,0	18,7	125,7
5.	56,3	125,7	116,0	26,1	142,1
6.	57,9	138,6	105,5	23,7	129,2
7.	62,0	141,0	92,4	24,9	117,3
8.	58,2	165,3	108,9	26,7	135,6
9.	64,5	138,8	111,9	24,4	136,3
10.	64,5	141,2	99,7	20,9	120,6

Наиболее существенные различия от действия удобрений на выход кормовых единиц наблюдали в фазе молочно-восковой спелости кукурузы. Наименьшей эффективностью обладали минеральные удобрения (вар. № 2, прибавка 26,6 ц/га к.е.), а наиболее действенным было сочетание жидкой фракции с минеральными удобрениями (вар. № 8, прибавка 72,0 ц/га к.е.).

При внесении минеральных удобрений под кормовую свеклу дополнительный сбор кормовых единиц составил 22,7 ц/га; в то время как от сочетания минеральных удобрений и исходного навоза, твердой фракции, жидкой фракции дополнительно собрали соответственно 35,9; 30,2; 40,1 ц/га кормовых единиц.

В условиях 1989 года внесение под кукурузу, выращиваемую на силос, минеральных удобрений (стандарта), твердой, жидкой фракций, стойлового навоза с добавками биогенных элементов (NPK) способствовало примерно одинаковому приросту урожайности этой культуры – на 88–96 ц/га (34,4–37,5 %) при урожайности на контроле 256 ц/га (табл. 2.43).

Таблица 2.43 – Влияние удобрений на урожайность кукурузы в 1989 г

№ вар.	Удобрения	Кукуруза на зеленую массу, ц/га	
		Урожайность.	Прибавка к контролю
1.	Без удобрений – контроль	256	–
2.	N150 P120 K120 – стандарт	344	88
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	414	158
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	348	92
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	354	98
6.	Твердая фракция 40 т/га	317	61
7.	Стойловый навоз 40 т/га	321	65
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	352	96
9.	Жидкая фракция 200 т/га	359	103
10.	Жидкая фракция 300 т/га	382	126

Исходный свиной навоз с добавками биогенных элементов (NPK) повышает урожайность зеленой массы кукурузы на 158 ц/га по сравнению с контролем. Твердая фракция и стойловый навоз в дозах по 40 т/га оказывают равное влияние на продуктивность кукурузы: прибавка урожая по отношению к контролю 61 ц/га (23,8 %) и 65 ц/га (25,4 %), по отношению к стандарту – 27 и 23 ц/га соответственно.

Действие жидкой фракции в дозе 200 т/га такое же, как и при дозе 100 т/га, доведенной до стандарта по элементам питания. Повышение нормы внесения жидкой фракции до 300 т/га дало незначительный эффект по сравнению с дозой 200 т/га – прирост 23 ц/га (6,4 %).

Все виды удобрений и их сочетания оказывали положительное влияние на рост урожайности кормовой свеклы (табл. 2.44). Наименее эффективными были минеральные удобрения, которые дали прибавку урожая по сравнению с контролем на 171 ц/га.

Таблица 2.44 – Влияние удобрений на урожайность корней кормовой свеклы в 1989 г

№ вар.	Удобрения	Кормовая свекла, ц/га	
		Урожайность	Прибавка к контролю
1.	Без удобрений – контроль	865	–
2.	N180 P180 K180 – стандарт	1036	171
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	1166	301
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	1166	301
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	1172	307
6.	Твердая фракция 60 т/га	1119	254
7.	Стойловый навоз 60 т/га	1130	265
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	1148	283
9.	Жидкая фракция 200 т/га	1130	265
10.	Жидкая фракция 300 т/га	1277	412

При использовании под кормовую свеклу исходного свиного навоза, твердой и жидкой фракций, стойлового навоза, обогащенных элементами питания до требований стандарта, урожайность увеличилась на 283–307 ц/га (32,7–35,5 %) по сравнению с контролем. Твердая фракция и стойловый навоз, внесенные в дозе 60 т/га, практически равноценны по своему действию и способствовали росту урожайности кормовой свеклы на 254 ц/га (29,4 %) и 265 ц/га (30,6 %). Такой же эффективностью обладает жидкая фракция в дозе 200 т/га – прибавка урожая 265 ц/га (30,0 %). Увеличение дозы внесения жидкой фракции до 300 т/га привело к росту урожайности на 412 ц/га (48 %) по сравнению с контролем и на 147 ц/га (13,0 %) по сравнению с дозой 200 т/га.

В 1988–1989 годах на полях НПО «Элита» была проведена серия экспериментов по определению влияния удобрений на урожайность кормовой свеклы, кукурузы и ячменя в севообороте с ротацией кукуруза – кукуруза

(табл. 2.45), кормовая свекла – кукуруза (табл. 2.46), кормовая свекла – кукуруза – ячмень (табл. 2.49), кукуруза – кукуруза – ячмень (табл. 2.50).

Таблица 2.45 – Влияние удобрений на урожайность силосной кукурузы, выращиваемой в ротации кукуруза – кукуруза

№ вар.	Удобрения	Кукуруза силос, ц/га	
		Урожайность	Прибавка к контролю
1.	Без удобрений – контроль	282	–
2.	N150 P120 K120 – стандарт	301	19
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	311	29
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	336	54
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	306	24
6.	Твердая фракция 40 т/га	312	30
7.	Стойловый навоз 40 т/га	316	34
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	312	30
9.	Жидкая фракция 200 т/га	336	54
10.	Жидкая фракция 300 т/га	324	42

Из данных табл. 2.45 видно, что удобрения, внесенные под кукурузу на первом году выращивания, оказывали влияние на урожайность кукурузы, возделываемой повторно. При этом действие минеральных удобрений было незначительным, а все виды органических удобрений и их сочетания с минеральными обеспечивали достоверное повышение урожайности культуры – 24–54 ц/га (8,5–19,1 %).

То же можно сказать о последствии удобрений, внесенных под кормовую свеклу, на прирост урожайности силосной кукурузы, выращиваемой после свеклы (табл. 2.46). Здесь наименьшей эффективностью обладали минеральные удобрения (рост урожайности против контроля 31 ц/га или 11,4 %), стойловый навоз в дозе 20 т/га, сбалансированный элементами питания до стандарта – 39 ц/га (14,3 %).

Таблица 2.46 – Влияние удобрений на урожайность силосной кукурузы, возделываемой после кормовой свеклы

№ вар.	Удобрения	Кукуруза силос, ц/га	
		Урожайность	Прибавка к контролю
1.	Без удобрений – контроль	272	–
2.	N180 P180 K180 – стандарт	303	31
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	315	43
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	345	73
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	305	33
6.	Твердая фракция 60 т/га	306	34
7	Стойловый навоз 60 т/га	319	47
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	311	39
9.	Жидкая фракция 200 т/га	372	100
10.	Жидкая фракция 300 т/га	370	98

Эффективность твердой фракции (20 т/га) с добавками биогенных элементов (NPK) заметно выше – прибавка урожайности 73 ц/га (26,8 %). Самые высокие показатели урожайности достигнуты по последствию жидкой фракции в дозах 200 т/га и 300 т/га (36,8 %) и 98 ц/га (36,0 %).

Качество силосной кукурузы, выращенной в ротации кукуруза-кукуруза и кормовая свекла – кукуруза, контролировали по содержанию нитратов. Как показал анализ, превышения допустимых концентраций по этому показателю в продукции не было (табл. 2.47, 2.48).

Таблица 2.47 – Содержание нитратов в зеленой массе кукурузы в фазе МВС, возделываемой после кукурузы

№ варианта	Удобрения	Нитраты мг/кг
1	Без удобрений – контроль	35,5
2	N150 P120 K120 – стандарт	45,7
3	Исходный навоз 100 т/га + N88 P95 K90	57,5
4	Твердая фракция 20 т/га + K82	46,8
5	Жидкая фракция 100 т/га + P75	54,9
6	Жидкая фракция 200 т/га	41,7
7	Жидкая фракция 300 т/га	57,5

Таблица 2.48 – Содержание нитратов в зеленой массе кукурузы в фазе МВС, возделываемой после кормовой свеклы

№ варианта	Удобрения	Нитраты мг/кг
1.	Без удобрений – контроль	67,6
2.	N180 P180 K180 – стандарт	16,2
3.	Исходный навоз 100 т/га + N118 P155 K150	25,7
4.	Твердая фракция 20 т/га + N30 P60 K142	50,1
5.	Жидкая фракция 100 т/га + N30 P135 K60	26,1
6.	Жидкая фракция 200 т/га	37,1
7.	Жидкая фракция 300 т/га	77,6

Все удобрения, внесенные под кормовую свеклу в 1987 году, оказали заметное влияние на продуктивность ячменя, возделываемого в 1989 г. в ротации кормовая свекла – кукуруза – ячмень (табл. 2.49). Здесь минимальным последствием обладали минеральные удобрения (стандарт), которые способствовали росту урожайности ячменя на 2,5 ц/га (5,1 %). От последствий исходного навоза и жидкой фракции, обогащенных элементами питания, получены прибавки урожайности соответственно 4,4 (8,9 %) и 3,1 ц/га (6,3 %). Наивысший рост урожайности ячменя обеспечила твердая фракция – 5,2 ц/га (10,6 %). Это выше стандарта на 2,7 ц/га (5,2 %). Значительной эффективностью обладала жидкая фракция сброженного свиного навоза в дозах 200 и 300 т/га – прирост урожайности ячменя составил соответственно 5,2 (10,6 %) и 8,0 ц/га (16,3 %).

Таблица 2.49 – Действие удобрений на урожайность ячменя, выращиваемого после кормовой свеклы и кукурузы

№ варианта	Удобрения	Ячмень, ц /га	
		Урожайность	Прибавка к контролю
1.	Без удобрений – контроль	49,2	–
2.	N180 P180 K180 – стандарт	51,7	2,5
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	53,6	4,4
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	54,4	5,2
5.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	52,3	3,1
6.	Жидкая фракция 200 т/га	54,4	5,2
7.	Жидкая фракция 300 т/га	57,2	8,0

При изучении последствий удобрений на урожайность ячменя в ротации кукуруза – кукуруза – ячмень (табл. 2.50) отмечено, что минеральные удобрения в дозе N150 P120 K120 (стандарт), внесенные в 1987 г. под кукурузу, не оказывали значительного влияния на продуктивность ячменя. Исходный навоз, твердая и жидкая фракции сброженного навоза с добавками биогенных элементов (NPK) способствовали росту урожайности против контроля соответственно на 2,5 (5,1 %), 2,9 (5,9 %) и 2,7 ц/га (5,5 %). Такой же рост урожайности отмечен при внесении жидкой фракции в дозе 200 т/га – прибавка 2,6 ц/га (5,3 %) при урожайности на контроле 49,5 ц/га. Наивысший урожай зерна ячменя (54,3 ц/га) достигнут при внесении жидкой фракции 300 т/га – прибавка 4,8 ц/га (9,7 %).

Таблица 2.50 – Последствие удобрений на урожайность ячменя, возделываемого в ротации кукуруза – кукуруза – ячмень

№ варианта	Удобрения	Ячмень, ц/га	
		Урожайность	Прибавка к контролю
1.	Без удобрений – контроль	49,5	–
2.	N150 P120 K120 – стандарт	50,8	1,3
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	52,0	2,5
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	52,4	2,9
5.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	52,2	2,7
6.	Жидкая фракция 200 т/га	52,1	2,6
7.	Жидкая фракция 300 т/га	54,3	4,8

Анализируя результаты полевых испытаний 1986–1989 гг., необходимо отметить следующее:

1. Самые высокие урожаи кукурузы, выращиваемой на силос, наблюдались при использовании в качестве удобрений исходного навоза и жидкой фракции отферментированной массы – соответственно 543 и 532 ц/га. Это превышает урожайность контрольного варианта соответственно на 149

и 138 ц/га и стандартного варианта (минеральные удобрения) на 44 и 33 ц/га (табл. 2.51). Минеральные удобрения и твердая фракция отферментированной массы с добавками биогенных элементов равноценны по своему действию, и их внесение обеспечило прирост урожайности кукурузы соответственно на 105 и 86 ц/га.

Таблица 2.51 – Влияние удобрений на урожайность зеленой массы кукурузы в период молочно-восковой спелости, ц/га, в период 1986–1989 г.

№ вар	Удобрения	Годы исследований				Сред нее	Прибавка			
		1986	1987	1988	1989		к контролю		к стандарту	
							ц/га	%	ц/га	%
1.	Без удобрений – контроль	424	536	359	256	394	–	–	–	–
2.	N150 P120 K120 – стандарт	538	652	461	344	499	105	26,6	–	–
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	562	682	513	414	543	149	37,8	44	8,8
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	469	643	460	348	480	86	21,8	–19	–3,8
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	–	–	449	354	401	7	–	-98	–
6.	Твердая фракция 40 т/га	–	–	462	317	389	–5	–	–110	–
7.	Стойловый навоз 40 т/га	–	–	470	321	395	1	–	–104	–
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	524	699	551	352	532	138	35,0	33	6,6
9.	Жидкая фракция 200 т/га	–	701	514	359	524	130	33	25	5
10.	Жидкая фракция 300 т/га	–	702	543	382	542	148	37,5	43	8,6

Твердая фракция без добавок и стойловый навоз как в сочетании с минеральными удобрениями, так и при использовании в чистом виде практически не влияют на продуктивность кукурузы.

Жидкая фракция в дозе 200 т/га способствует росту урожайности кукурузы в такой же степени, как и доза 100 т/га с добавками биогенных

элементов (NPK). Повышение вносимой дозы жидкой фракции до 300 т/га не обеспечивает существенного роста урожая кукурузы, но в то же время приводит к повышенному содержанию нитратов в продукте.

2. Лучшей формой удобрения при выращивании кормовой свеклы (табл. 2.52) является жидкая фракция с добавками биогенных элементов (NPK), обеспечившая урожай корней 964 ц/га. Это выше контрольного урожая на 286 ц/га, стандартного урожая – на 84 ц/га. При использовании в качестве удобрений исходного навоза и твердой фракции рост урожайности свеклы соответственно составил 261 и 226 ц/га, что выше стандартного урожая на 59 и 24 ц/га. По результатам *трехлетних* наблюдений отмечено, что жидкая фракция в дозе 200 т/га обладает такой же эффективностью, что и доза 100 т/га с добавками биогенных элементов (NPK). На основании *двухлетних* исследований установлено, что действие твердой фракции и стойлового навоза равноценно.

Таблица 2.52 – Влияние удобрений на урожайность корней кормовой свеклы, ц/га, в период 1986–1989 г.

№ вар.	Удобрения	Годы исследований				Сред- нее	Прибавка			
		1986	1987	1988	1989		к контролю		к стандарту	
							ц/га	%	ц/га	%
1.	Без удобрений – контроль	549	635	663	865	678	–	–	–	–
2.	N180 P180 K180 – стандарт	814	830	838	1036	880	202	29,8	–	–
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	801	857	932	1166	939	261	38,5	59	6,7
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	727	833	892	1166	904	226	33,3	24	2,7
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	–	–	967	1172	1069	–	–	–	–
6.	Твердая фракция 60 т/га	–	–	879	1119	999	–	–	–	–
7.	Стойловый навоз 60 т/га	–	–	924	1130	1027	–	–	–	–
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	875	843	990	1148	964	286	42,2	84	9,5
9.	Жидкая фракция 200 т/га	–	847	1017	1130	994	316	46,7	–	–
10.	Жидкая фракция 300 т/га	–	880	997	1277	1051	373	55	–	–

3. Двухлетние наблюдения действия удобрений на урожайность силосной кукурузы, выращиваемой в ротации кукуруза – кукуруза – кукуруза, показали, что наименьшим действием обладали минеральные удобрения, наибольшим – твердая и жидкая фракции в высоких дозах (табл. 2.53).

Таблица 2.53 – Последствие удобрений на урожайность силосной кукурузы, возделываемой повторно

№ вар.	Удобрения	Урожайность, ц/га		Среднее	Прибавка	
		1988	1989		ц/га	%
1.	Без удобрений – контроль	371	282	326	–	–
2.	N150 P120 K120 – стандарт	443	301	372	336	11,0
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	495	311	403	67	20,6
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	523	336	430	94	28,8
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	–	306	–	–	–
6.	Твердая фракция 40 т/га	–	312	–	–	–
7.	Стойловый навоз 40 т/га	–	316	–	–	–
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	514	312	413	77	23,6
9.	Жидкая фракция 200 т/га	508	336	422	86	26,4
10.	Жидкая фракция 300 т/га	556	324	440	104	31,9

4. Кукуруза, возделываемая после кормовой свеклы, отзывалась на удобрения, внесенные под первую культуру. Минимальным последствием обладали минеральные удобрения – прибавка 38 ц/га. Наибольшим –

твердая фракция (прибавка 124 ц/га) и жидкая фракция в высоких дозах (прибавка 119–120 ц/га). Усредненные данные двухлетних наблюдений представлены в табл. 2.54.

Таблица 2.54 – Последствие удобрений на урожайность силосной кукурузы, возделываемой после кормовой свеклы

№ вар.	Удобрения	Урожайность, ц/га		Среднее	Прибавка	
		1988	1989		ц/га	%
1.	Без удобрений – контроль	427	272	350	–	–
2.	N180 P180 K180 – стандарт	472	303	388	33	10,9
3.	Исходный навоз 100 т/га + NPK до стандарта	582	315	448	98	28,0
4.	Твердая фракция 20 т/га + NPK до стандарта	604	345	474	124	35,4
5.	Стойловый навоз 20 т/га + NPK до стандарта	–	305	–	–	–
6.	Твердая фракция 60 т/га	–	306	–	–	–
7.	Стойловый навоз 60 т/га	–	319	–	–	–
8.	Жидкая фракция 100 т/га + NPK до стандарта	553	311	432	82	23,4
9.	Жидкая фракция 200 т/га	567	372	470	120	34,3
10.	Жидкая фракция 300 т/га	568	370	469	119	34,0

5. Действие твердой и жидкой фракций отферментированного навоза на урожай ячменя, возделываемого после кукурузы на силос, обеспечило

рост урожайности на 2,5–2,9 ц/га (5,1–5,9 %). Минеральные удобрения в этом случае оказались неэффективными.

Действие отферментированного навоза на урожай ячменя, возделываемого после кормовой свеклы и кукурузы на силос, также эффективно: прибавка урожая составила 3,1–5,2 ц/га (6,3–10,6 %). Прирост урожая ячменя от действия минеральных удобрений составил 2,5 ц/га (5,1 %).

2.6.2. Переработка обезвоженного шлама в кормовые добавки и биогукус

Обезвоженный шлам содержит весь набор незаменимых аминокислот и различные витамины, преимущественно группы В. Установлено, что 1 кг сухого вещества навоза КРС, сброженного в мезофильном режиме, содержит 210 г аминокислот, в термофильном – 240 г. Из навоза одной коровы в год можно получить 20–30 г витамина В₁₂ [4]. Учитывая это, обезвоженный шлам можно использовать для производства белково-витаминных кормовых добавок.

Вопросы применения переработанного навоза для кормления сельскохозяйственных животных изучены недостаточно, поэтому велика вероятность того, что продукция, полученная от животных, выращенных на таком корме, может содержать тяжелые металлы, антибиотики и другие токсичные вещества. Кроме того, существует некоторое предубеждение относительно употребления таких продуктов в пищу. По этим причинам шлам в качестве добавки в корм животных используется ограниченно.

Более эффективным способом переработки шлама является вермикомпостирование – приготовление компоста с помощью специальных (навозных, дождевых, калифорнийских) червей. Метод основан на дигестивной (разлагающей) и экскректорной (выделяющей) функциях жизнедеятельности червей. Черви перерабатывают органические отходы, растительные остатки, огромное количество простейших одноклеточных, микробов, грибов, водорослей, выделяя продукт жизнедеятельности – биогукус, содержащий от 11 до 35 % гумуса. Гумус – органическое вещество почвы, состоящее из гуминовых и фульвокислот, макро- и микроэлементов, аминокислот, гиббереллинов и других биологически активных веществ; в нем сосредоточено 98 % запасов почвенного азота, 60 % фосфора, 80 % калия. Биогукус обладает способностью удерживать влагу, структу-

рировать почву, придавая связность песчаным почвам и рыхлость – глинистым. Он не содержит патогенную микрофлору, яйца гельминтов, семена сорняков и тяжелые металлы. При обработке биогумусом почв, зараженных радионуклидами, образуются гуматы тяжелых металлов, которые не разлагаются корневой системой растений, не используются для их питания, и не накапливаются в них. Все это обуславливает эффективность применения биогумуса для повышения плодородия истощенных малопродуктивных почв и получения экологически чистой сельхозпродукции [58].

В Украине вопросами вермикультивирования занимаются в ассоциации «Биоконверсия» (Ивано-Франковская область), в Полтавском Государственном сельскохозяйственном институте и ряде других организаций.

Результаты физико-химических исследований биогумуса, проведенные ОАО «Кременчугская экологическая испытательная лаборатория» приведены в табл. 2.55 [59].

Таблица 2.55 – Состав и свойства биогумуса

Наименование показателей	Значение	
	нормативное	фактическое
Массовая доля влаги, %, не более	45	29
Содержание гумуса, %, не менее	15	17,1
Водородный показатель, pH	6,5 ÷ 7,5	7,3
Массовая доля:		
общего азота, %, не менее	0,8	0,8
общего фосфора, %, не менее	0,7	0,75
общего калия, %, не менее	0,7	0,79
Содержание водорастворимых солей, мг/кг, не менее	5000	5170

Влияние биогумуса на урожайность различных культур изучалось в Полтавской области. Установлено, что для получения одинаковой урожайности норма внесения биогумуса значительно ниже нормы внесения навоза. Например, для сахарной свеклы прирост урожайности в среднем на 16 % достигается при внесении 40 т/га навоза, тогда как для биогумуса достаточной является доза 4 т/га. Результаты исследований по использо-

ванию биогумуса при выращивании различных культур приведены в табл. 2.56 – 2.60 [60].

Таблица 2.56 – Прирост урожая сахарной свеклы и кукурузы при использовании биогумуса

Вид удобрений	Прирост урожая			
	сахарная свекла		кукуруза на зерно	
	ц/га	%	ц/га	%
Вермикомпост, 4 т/га	48	17,8	11,0	24,2
Навоз обычный, 40 т/га	41	15,2	14,0	30,8

При использовании органических удобрений в севообороте сахарная свекла – кукуруза на зерно – ячмень биогумус также имеет преимущества перед навозом (табл. 2.57)

Таблица 2.57 – Прирост урожая ярового ячменя при использовании биогумуса и навоза

Вид удобрений	Предшественник	
	сахарная свекла	кукуруза на зерно
	Прирост урожая	
	ц/га	%
Биогумус, 4 т/га	2,9	5,4
Навоз, 40 т/га	2,6	1,0

Таблица 2.58 – Влияние биогумуса на урожайность крупяных культур

Норма внесения биогумуса	Гречиха		Просо	
	Прирост урожая			
	ц/га	%	ц/га	%
4 т/га	10,1	17,4	3,7	38,7

Таблица 2.59 – Прирост урожая озимой пшеницы в зависимости от способа внесения биогумуса

Норма и способ внесения биогумуса,	Прирост урожая	
	ц/га	%
300 кг/га вразброс	2,6	17,2
300 кг/га локально строчкой	5,8	38,4

Таблица 2.60 – Влияние стартового внесения биогумуса и минеральных удобрений на урожайность

Удобрения	Озимая пшеница		Сахарная свекла		Подсолнечник	
	Урожайн., ц/га	Прирост, ц/га	Урожайн., ц/га	Прирост, ц/га	Урожайн., ц/га	Прирост, ц/га
Биогумус 100 кг/га	32,0	5,0	260	60	20,4	11,4
Минудобрения N17	–	–	–	–	12,0	3,0

Хозяйства, производящие биогумус, специализируются либо на выращивании маточного поголовья червей либо на промышленном производстве биогумуса и биомассы червей. По наиболее распространенной технологии выращивания червей их содержат в ложах, расположенных на бетонированных площадках или в траншеях шириной 2 м и глубиной 0,3–0,4 м. Площадки и траншеи должны находиться вблизи ферм. Площадь ложа 2 м² (2×1 м), высота 15–30 см. В таком ложе могут находиться 50–100 тыс. особей.

При устройстве площадок на открытом воздухе высокой производительности можно достичь только в теплое время года. При круглогодичном производстве все хозяйство должно находиться в отапливаемом помещении.

При промышленном разведении червей необходимо максимально механизировать трудоемкие процессы. В этом случае ведением хозяйства средней величины, состоящего из 450–500 лож или секций размером 2×1 м, может заниматься один человек. Такое хозяйство через 18 месяцев после закладки может производить около 200 т биогумуса и 0,4 т биомассы червей в год [58].

2.6.3 Использование и переработка жидкой фракции сброженной массы

Выбор технологии переработки жидкой фракции сброженной массы зависит от способа ее дальнейшего использования. На практике жидкие стоки используют для полива посевов, как питательную среду для выращивания водорослей, перерабатываемых в кормовые добавки, в качестве технической воды при уборке навоза в животноводческих помещениях.

Для выращивания водорослей (водного гиацинта, хлореллы) отфериентированные стоки используют в странах с теплым климатом – в Италии, на Филиппинах; крупные установки имеются также в США. В странах СНГ подобного опыта нет.

Известны технологии очистки жидких стоков животноводческих ферм, в которых не предусматривается анаэробное сбраживание, и процесс переработки исходного навоза осуществляется по следующей схеме: приемный резервуар → разделительная установка → вертикальный отстойник → площадка биотермического обеззараживания → карантинные емкости → установка для термического обеззараживания стока → пруд-накопитель → водорослевый пруд → рачковый пруд → рыбоводный пруд → пруд-накопитель очищенной воды → поля орошения. Такие системы требуют крупных капитальных вложений, очень громоздки, занимают большие площади [3].

На установке «Биогаз-301С» нами совместно с Институтом гидробиологии Академии наук Украины были проведены исследования по доочистке жидкой фракции сброженных стоков методами центрифугирования и фильтрации. Результаты исследований представлены в табл. 2.61.

Таблица 2.61 –Показатели эффективности очистки жидкой фракции сброженных стоков методом разделения

Этапы очистки	Взвешенное вещество		БПК ₅		ХПК		Фосфаты		Азот общий		Аммонийный азот		Хлориды	
	г/л	эф-фект, %	мгО ₂ /л	эф-фект, %	мгО ₂ /л	эф-фект, %	мг/л	эф-фект, %	мг/л	эф-фект, %	мг/л	эф-фект, %	мг/л	эф-фект, %
Отферментированные стоки без разделения	60,4	–	1280	–	8377	–	30,6	–	3877	–	1990	–	730	–
I. Жидкая фракция после центрифугирования	0,22	96,4	512	60	4788	42,8	12,2	60,1	2605	32,8	1980	0,5	725	–
II. Жидкая фракция после ультрафильтрации	0,025	99,6	421	67,1	1720	79,5	2,7	21,2	1753	54,8	1410	29	670	7,5
III. Жидкая фракция после центрифугирования и ультрафильтрации	0,014	99,8	380	70,3	1302	84,5	–	–	750	80,6	–	–	592	18,3
IV. Жидкая фракция после центрифугирования, ультрафильтрации и выращивания водорослей	0,006	99,9	268	79,1	449	94,6	4,3	85,9	407	89,5	153	92,3	270	62,7

Примечания: 1. Время обработки жидкости на центрифуге в режиме 3000 об/мин – 10 мин 2. Ультрафильтрация производится с использованием мембраны УПМ-55П

Как видно из приведенных данных, на этапе I очистки практически полностью удаляются взвешенные вещества, существенно уменьшаются значения БПК, ХПК, концентрация фосфатов, общего азота. Количество растворенных хлоридов и аммонийного азота в жидких стоках остается

неизменным.

Ультрафильтрация (II этап) обеспечивает более глубокую очистку сброженных стоков от органических веществ по сравнению с центрифугированием, но скорость фильтрации, как показал эксперимент, быстро снижается из-за забивания фильтров взвешенными веществами.

Предварительное удаление взвешенных веществ центрифугированием позволяет более чем в два раза повысить производительность ультрафильтрационных мембран. Ультрафильтрация после центрифугирования значительно эффективнее (III этап).

Установлено, что выращивание водорослей на предварительно отфильтрованных стоках (IV этап) значительно повышает показатели очистки, причем наиболее эффективно использование зеленых водорослей, в частности, хлореллы и сценедесмуса. При этом наилучший результат получен на разведенных (не менее чем 1: 4) стоках. Водоросли (хламидомонас), адаптированные к концентрированным стокам свиноводческих комплексов, также обеспечивают высокие показатели очистки: значение ХПК снижается до 148 мг O_2 /л, концентрация хлоридов – до 81 мг/л, суммы ионов натрия и калия – до 129 мг/л, аммичного азота – до 139 мг/л, нитритов – до 0,6 мг/л, нитратов – до 10 мг/л, общего фосфора – до 26 мг/л.

Эффективный способ доочистки жидкой фракции сброженного свиного навоза разработан совместно специалистами ВНИИкомпрессормаш (г. Сумы), Киевского национального университета пищевых технологий и НТУ «ХПИ» [61]. Принципиальная технологическая схема доочистки и ее узлов показана на рис. 2.48, 2.49, 2.50. Установка работает следующим образом.

Жидкая фракция отферментированной массы из сборника фугата поступает в электрокоагулятор 1 общего корпуса 5. Жидкость, отделенная здесь в результате коагуляции от осадка, попадает в тонкослойный отстойник 3, где разделяется на осветленную часть (воду), осадок и пену. Пена улавливается пеносборником 2, а вода подвергается затем осветлению в электрофлотаторе 4, откуда насосом 11 подается на фильтр 12. При работе в режиме фильтрации клапан 13 на сливной линии закрыт; очищаемая вода проходит сквозь стенки трубчатых фильтров через фильтрационные каналы, задерживающие твердые частицы, и стекает по линии слива 15 в колонну 14. При засорении фильтрационных каналов давление внутри

фильтра повышается, что приводит к открытию вентиля на сливной линии 13. В результате этого весь поток очищаемой жидкости свободно проходит через фильтр и по линии 13 сливается в шламосборник 44. При этом жидкость промывает фильтрационные каналы, освобождая их от твердых частиц. Давление в фильтре падает, запорный клапан закрывает вентиль 13 на линии слива, и цикл фильтрования повторяется.

Колонна отдувки аммиака из воды 14 снабжена плоско-параллельной насадкой. Через линию 20 осуществляется подача воды из колонны 14 в реактор 18. Под отбойный зонт аэратора 21 реактора 18 компрессором 23 по трубе 22 подается воздух, который в виде пузырьков всплывает на поверхность, образуя пену. Пена поднимается по трубопроводу 19 и удаляется струей воздуха, подаваемого тангенциально вентилятором 17 в нижнюю часть колонны 14. Здесь воздух, нагнетаемый вентилятором 17, смешивается с воздухом, подаваемым аэратором 21, и поднимается по колонне 14 вверх вдоль поверхности ее насадки. Вода, содержащая активный ил, из реактора 18 поступает в отстойник 25, где отделяется от активного ила. По трубопроводу 27 вода самотеком поступает в реактор 28 под отбойный зонт аэратора 29, куда компрессором 31 по системе рециркуляции 30 нагнетается воздух, который всплывает вдоль поверхности насадки 32.

Аналогично работает реактор 33 (III). Из реактора 33 вода поступает в реактор 34 (IV), и туда же трубопроводом 47 подается часть воды из колонны 14. Образующийся суммарный поток воды поднимается в реакторе 34 (при отключенной системе рециркуляции 36) вдоль поверхности насадки, покрытой биопленкой, и покидает реактор 34 через трубу 39.

Очищенная вода поступает в отстойник 40, откуда насос 43 подает ее по трубопроводу 42 на потребление, например, в систему навозоудаления фермы. Осадок удаляют через сливную линию 41 в сборник шламов 44, куда поступают все остальные сливы и осадки через вентили и сливные линии 6, 7, 8, 9, 13 и 26.

Содержимое сборника шламов 44 периодически выгружается с помощью насоса 46 и поступает на дальнейшую переработку, например, в органические удобрения.

В табл. 2.62 приведены результаты очистки коммунальных стоков на указанной установке.

Таблица 2.62 – Результаты доочистки коммунальных сточных вод

	Исходное содержание, мг/л	Конечное содержание, мг/л	Степень очистки, %
Взвешенные вещества	800	5	99,75
ХПК	1000	10	99,8
БПК	2000	10	99,8
Общий азот	400	0	100

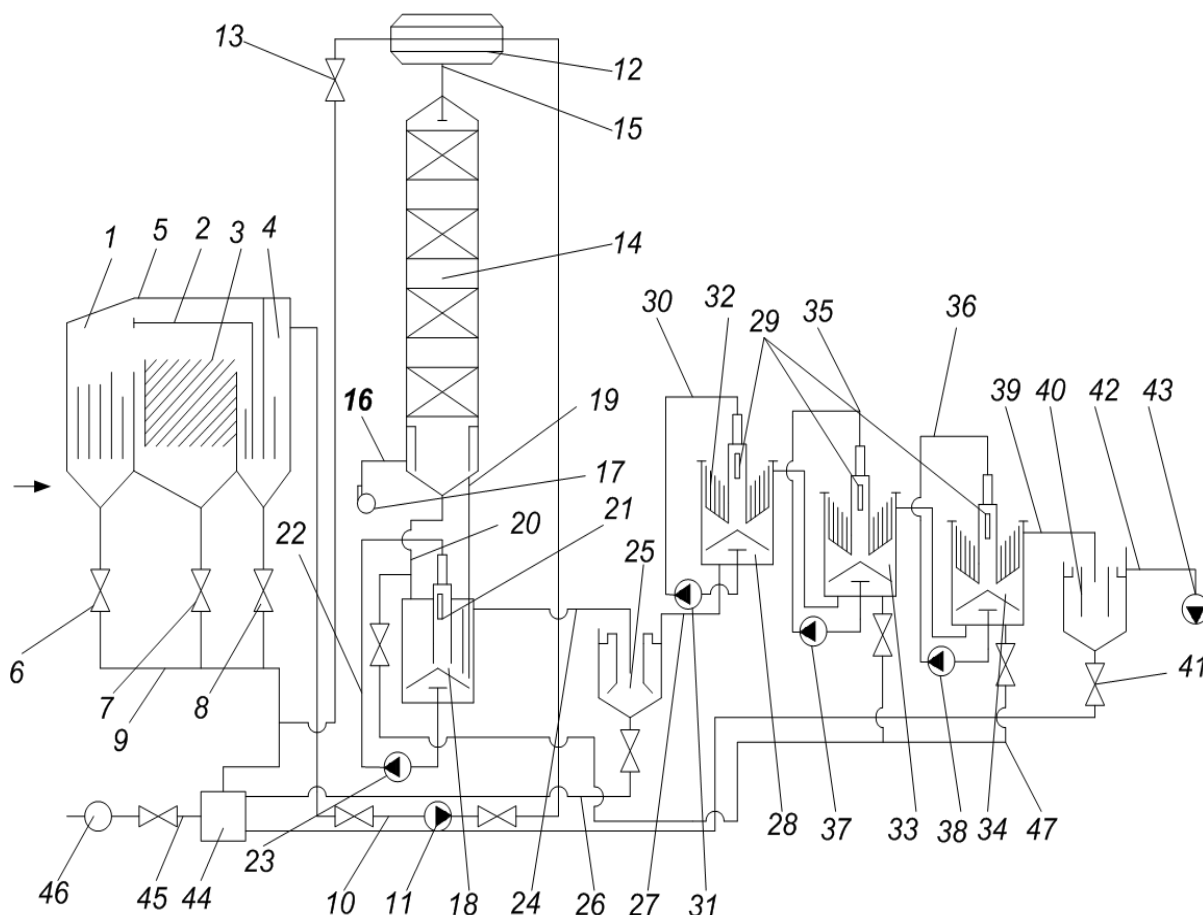


Рисунок 2.48 – Принципиальная технологическая схема узла доочистки жидкой фракции от ферментированной массы установки «Биогаз-301С»: 1 – электрокоагулятор; 2 – пеносборник; 3 – тонкослойный отстойник; 4 – электрофлотатор; 5 – общий корпус (для устройств поз. 1, 2, 3, 4); 6, 7, 8, 13, 41 – арматура; 9, 10, 15, 16, 19, 20, 22, 24, 26, 27, 30, 39, 42 – трубопроводы; 11 – насос; 12 – фильтр; 14 – колонна; 17 – вентилятор; 18 – реактор (I); 21 – аэратор; 23 – насос; 25 – отстойник; 28 – реактор (II); 29 – аэраторы; 31, 37, 38 – компрессоры; 43 – насос

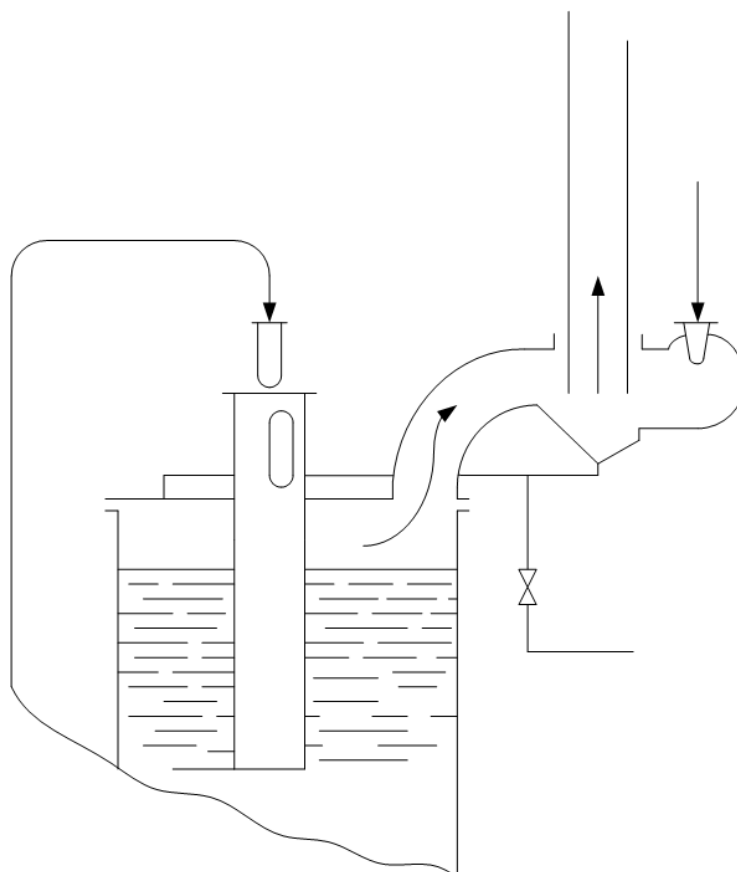


Рисунок 2.49 – Схема соединения реактора (I) с колонной (поз.14)

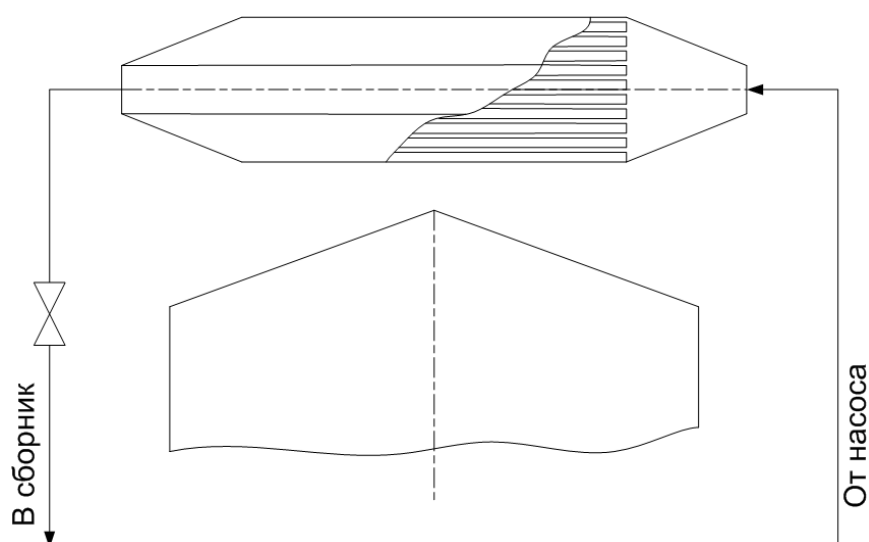


Рисунок 2.50 – Фильтр

На диаграмме рис. 2.51 показаны изменения некоторых характеристик свиного навоза на разных этапах его переработки.

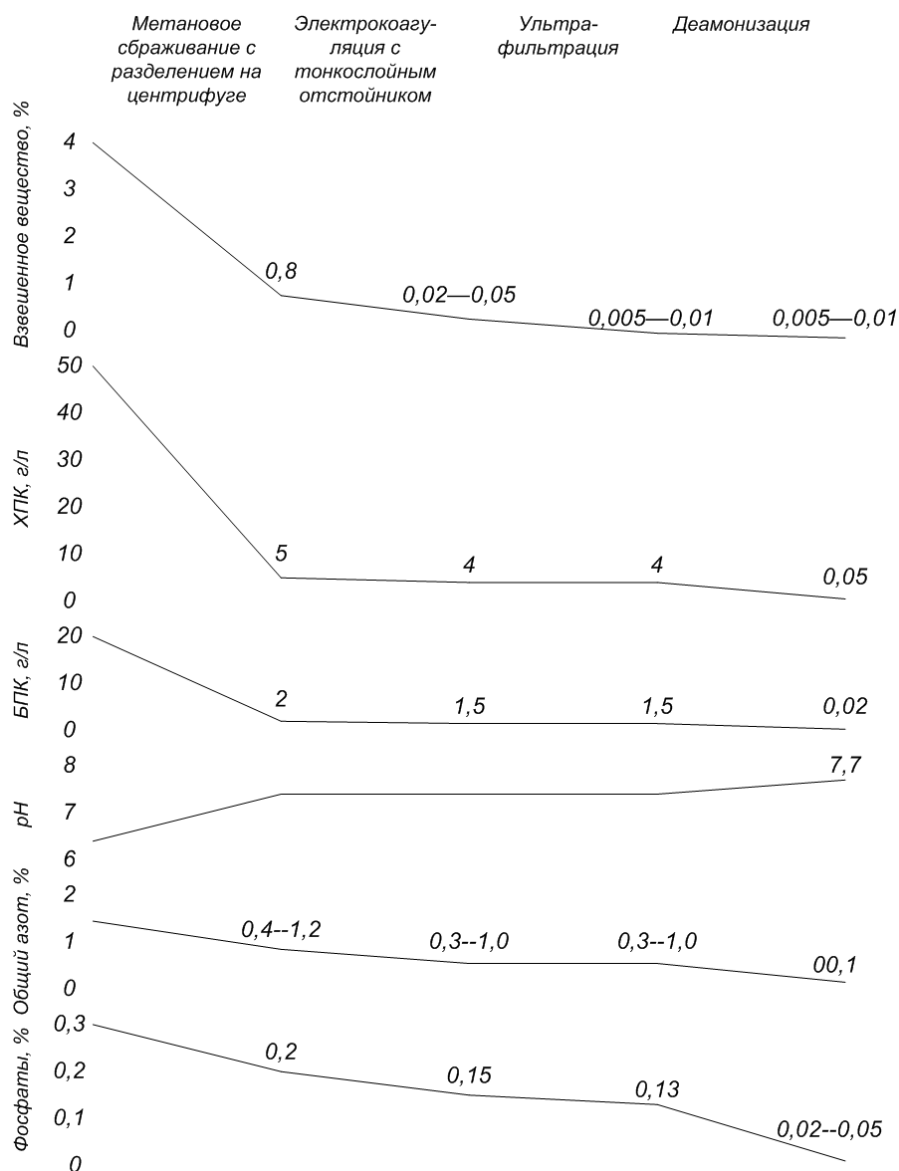


Рисунок 2.51 – Диаграмма изменения некоторых характеристик свиного навоза на разных этапах переработки

На рис. 2.52 показана принципиальная схема узла доочистки жидкой фракции отферментированного навоза крупного рогатого скота в смеси с куриным пометом. Данную схему использует венгерская фирма «Конструмэкс» на установках метанового сбраживания. Принцип ее работы состоит в следующем: жидкая фракция отферментированного навоза с содержанием сухого вещества 0,5 % и размером твердых частиц до 0,25 мм из сборника 1 с помощью насоса 2 подается в зону аэрации 3.1 емкости 3, куда с помощью компрессора 4 нагнетается воздух для окисления органического вещества. Удельный расход воздуха составляет 20–40 м³ / м³ обра-

батываемых стоков. Жидкость через переливы 5 поступает в камеру 3.2, а оттуда – в отстойник 3.3. Осевший ил из отстойника периодически выводится через штуцер 6, а осветленная часть жидкости переливается в открытый сборник 7. В качестве таких сборников рекомендуется использовать озера с доньями, покрытыми полиэтиленовой пленкой и рассчитанными на 4–6-х-месячный запас жидкости для полива сельхозкультур или двух-, трехсуточный запас для смыва навоза в животноводческих помещениях.

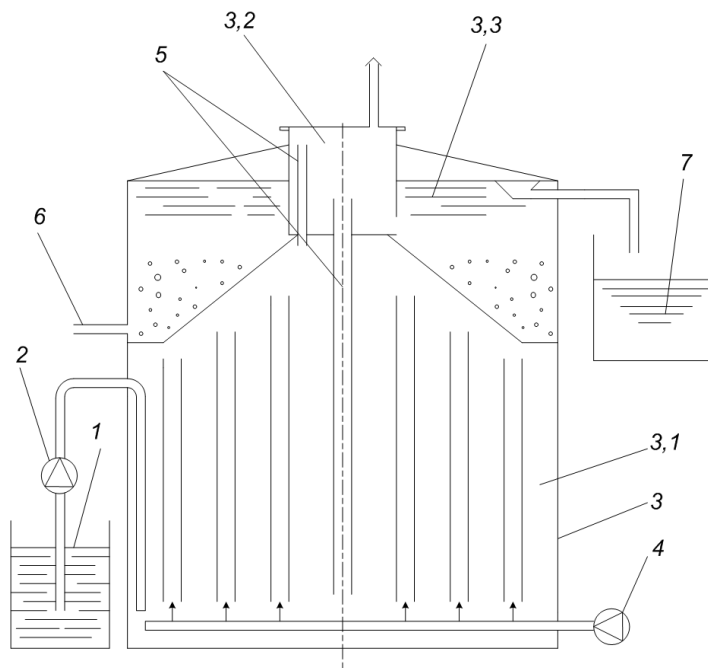


Рисунок 2.52 – Узел доочистки жидких стоков (разработка фирмы Конструмэкс):

1 – сборник; 2 – насос; 3 – емкость; 3.1 – зона аэрации; 3.2 – камера; 3.3 – отстойник; 4 – компрессор; 5 – переливы; 6 – слив ила; 7 – сборник очищенной жидкой фракции

Одним из эффективных способов использования сброженных жидких стоков является приготовление на их основе жидких органо-минеральных удобрений путем введения питательных элементов. При этом возможно готовить смеси, которые могут использоваться как для увлажнения, так и питания растений. В качестве питательных веществ могут использоваться суперфосфат, аммиачная селитра, хлористый калий.

2.6.4 Оборудование для сбора и использования продуктов разделения сброженной массы

Оборудование для сбора и использования твердой и жидкой фракций отферментированной массы можно разделить на три группы:

- оборудование для сбора и транспортирования массы;
- оборудование для внесения жидкой и твердой фракций в почву в качестве удобрений или для полива;
- специальное оборудование доочистки жидкой фракции или переработки обезвоженного шлама.

К первой группе относится оборудование общего назначения: сборники-накопители, транспортеры различного типа, автотранспортные средства, прицепы, насосное оборудование, арматура, трубопроводы.

Ко второй группе относится стандартное оборудование, которое используется в сельскохозяйственном производстве для внесения удобрений как в твердом, так и в жидком виде.

К третьей группе относится специальное нестандартное оборудование, проектирование и изготовление которого осуществляется специализированными организациями.

2.6.4.1 Внутренние коммуникации биогазовых установок, насосное оборудование и арматура

Внутренние коммуникации биогазовых установок состоят из трубопроводов, насосного оборудования и арматуры.

При разработке транспортной схемы установки необходимо:

- определить условный диаметр прохода трубопроводов и их протяженность;
- рационально компоновать оборудование с соблюдением необходимых уклонов трубопроводов;
- исключить застойные зоны — места возможного скопления осадка — в обвязке оборудования;
- предусмотреть теплоизоляцию участков вероятного замерзания транспортируемой жидкости в холодное время года.

Проектирование трубной обвязки должно выполняться в соответствии с требованиями техники безопасности, удобства обслуживания, при соблюдении соответствующих строительных и монтажных норм.

Все напорные трубопроводы должны иметь уклоны не менее 2° в сторону движения транспортируемого продукта. Трубопроводы, по которым транспортирование осуществляется самотеком, должны иметь уклон не менее $10\text{--}15^{\circ}$.

Для отдельных узлов схемы и оборудования, в которых может накапливаться осадок, должна быть предусмотрена возможность промывки. Это относится, в частности, к следующим устройствам:

- загрузочной линии насос-метантенк;
- линии выгрузки из метантенка в систему разделения отферментированной массы;
- измельчителю исходного сырья;
- устройству для разделения отферментированной массы;
- ловушке крупных включений исходного сырья;
- насосному оборудованию.

Промывка может производиться жидкой фракцией отферментированной массы (фугатом).

Для транспортирования жидкого навоза на молочных, откормочных и свиноводческих комплексах широкое распространение получили насосы типа НЖЦ, НЦИ и НШ. Они могут успешно использоваться в установках метанового сбраживания на линии подачи исходного сырья. Благодаря наличию пропеллерной мешалки эти насосы можно использовать также для перемешивания навозной массы в навозосборнике. Режущие ножи насоса обеспечивают предварительное измельчение различных включений.

Перекачивание навоза и перемешивание сбраживаемой массы в аппаратах биогазовой установки может осуществляться с помощью насосов для загрязненных жидкостей (фекальных насосов). Это одноступенчатые консольные насосы горизонтального или вертикального исполнения, изготавливаемые из чугуна и предназначенные для перекачивания бытовых и промышленных канализационных стоков и сред с волокнистыми включениями. Их отличительной особенностью является значительная ширина проходных сечений проточной части, обеспечивающая перекачивание сред, содержащих твердые частицы.

В табл. 2.63 представлены номенклатура и параметры указанных насосов, изготавливаемых на ЗАО "Рыбницкий насосный завод" (Молдова).

Таблица 2.63 – Номенклатура насосов, выпускаемых ЗАО «Рыбницкий насосный завод»

№ п/п	Наименование агрегата	Комплектуемый эл/двигатель		Параметры		Габаритные размеры, мм	Масса, кг
		наименование	мощность	Напор, Н, м	Подача, О, м ³ /ч		
1.	СМ 100-65-200/2	4A200МУ3 B200M2Y3	37	56-52-47,5	60-100-125	1678×450×647 1748×475×732	420 520
2.	СМ 100-65-200a/2	4A180M2Y3 B180M2Y3	30	46-42-38	58-86-110	1620×410×598 1723×460×708	345 435
3.	СМ 100-65-200б/2	4A180 2Y3 B180 2Y3	22	36,5-32-31	55-75-100	1580×410×598 1668×460×708	325 390
4.	СМ 100-65-200/4	4A112M4Y3 B112M4Y3	5,5	14-12-10,5	35-62,5-75	1305×310×513 1433×310×513	200 245
5.	СМ 100-65-200a/4	4A100 Y3 B100 4Y3	4	11,5-8,2-8	33-56-67	1248×310×513 1393×310×513	185 220
6.	СМ 100-65-200б/4	4A100 4Y3 B100 4Y3	3	8,4-6,3-5,4	30-50-60	1218×310×513 1368×310×513	180 220
7.	СМ 100-65-250/4	4AM132 4Y3 2B132 4Y3	7,5	24-20-18	10-50-60	1350×350×560 1365×350×560	235 292
8.	СМ 100-65-250a/4	4AM112M4Y3 2B112M4Y3	5,5	20,2-18,6-14	8-47-56	1320×350×560 1360×350×560	215 260
9.	СМ 100-65-250б/4	4AM112M4Y3 2B112M4Y3	5,5	16,5-13,5-11,5	6-44-54	1320×350×560 1360×350×560	215 260
10.	СМ 100-65-315a/4	4AM160 4Y3 B180 4Y3	22	34-32-29	40-80-116	1645×400×668 1735×400×668	405 420
11.	СМ 100-65-315a/4	4AM160M4Y3 B160M4Y3	18,5	28-26-24	36-72,5-102	1650×400×668 1725×400×668	395 470
12.	СМ 100-65-315б/4	4AM160 4Y3 B160 4Y3	15	21-20-18,5	32-65-85	1610×400×668 1660×400×668	370 440

В составе биогазовых установок могут также использоваться насосы свободновихревые (СВН), предназначенные для перекачивания бытовых и промышленных загрязненных сред, содержащих волокнистые вещества, а также фекальных и сточных вод (рис. 2.53). Их применяют для перекачки сред с температурой до 90 °С, плотностью 1075–1300 кг/м³, массовой концентрацией твердых частиц 20–30 % при максимальном линейном размере включений 15–50 мм.

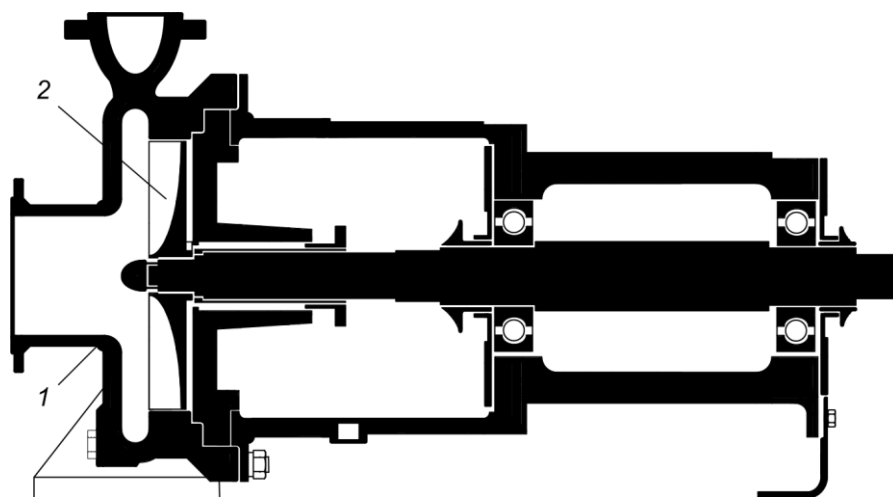


Рисунок 2.53 – Устройство насоса СВН

1 – корпус, 2 – рабочее колесо

Насос СВН – горизонтальный консольный с осевым подводом жидкости – имеет рабочее колесо 2 свободновихревого типа, утопленное в нишу корпуса насоса 1. Концевое уплотнение – сальникового типа. Опоры ротора – подшипники качения, которые смазываются консистентной смазкой.

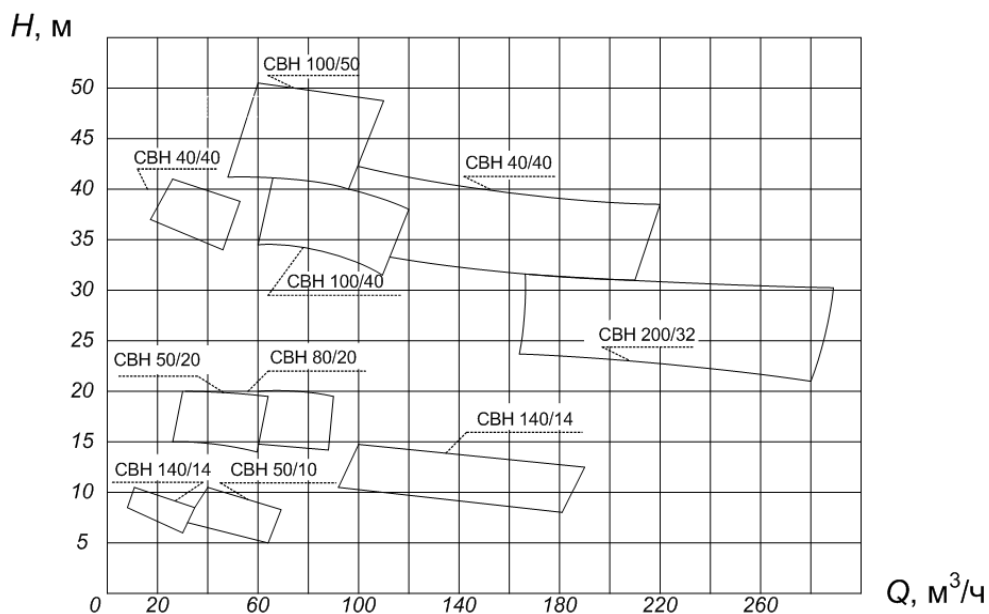


Рисунок 2.54 – Характеристика насосов СВН

Номенклатура насосов СВН, выпускаемых ОАО Сумкой завод «Насосэнергомаш», приведена в табл. 2.64.

Таблица 2.64 – Номенклатура насосов СВН

Обозначение насоса	Параметры		Привод	
	Напор, м	Подача, м ³ /ч	Марка	Мощность, кВт
СВН 6,3/5	5	6,3	АИР-71Ж0М2	0,55
СВН 12,5/20	20	12,5	АИР-80Ж2У2	–
СВН 20/10	20	10	АИР-90L-4У3	–
СВН 40/40	40	40	АИР-160S2У3	–
СВН 50/10	10	50	АИР-100L-4У3	3,3
СВН 50/20	20	50	АИР1325-4У3	6,1
СВН 80/20	20	80	АИР132М-4У3	11
СВН 100/10	10	100	ЧА-1325-4У3	–
СВН 100/40	40	100	АИР-180М-2У3	24
СВН 100/50	50	100	ЧАМН-180S-2У3	30
СВН 200/32	32	200	ЧАМ-225МЧУ3	–

При работе с загрязненными жидкостями используются также винтовые насосы. Одновинтовые насосы имеют все преимущества насосов объемного типа: высокое давление, слабое перемешивание перекачиваемой жидкости, большую высоту всасывания. Плавное движение потока в насосе оказывает щадящее действие на микроорганизмы, чувствительные к срезovým усилиям, возникающим при перемешивании суспензии механическими мешалками. Кроме того, эти насосы обладают рядом дополнительных преимуществ: содержат небольшое количество движущихся деталей, не имеют клапанов и сложных проходов, вследствие чего существенно снижаются гидравлические потери. Достоинством являются также небольшие размеры и вес одновинтовых насосов.

Для установок метанового сбраживания используются одновинтовые насосы низкого давления с давлением до 10 кгс/см².

Устройство одновинтового насоса представлено на рис. 2.55.

Принцип работы одновинтового насоса: в цилиндре с профилированной внутренней поверхностью (обойме) вращается винт. Винт насоса – односторонний.

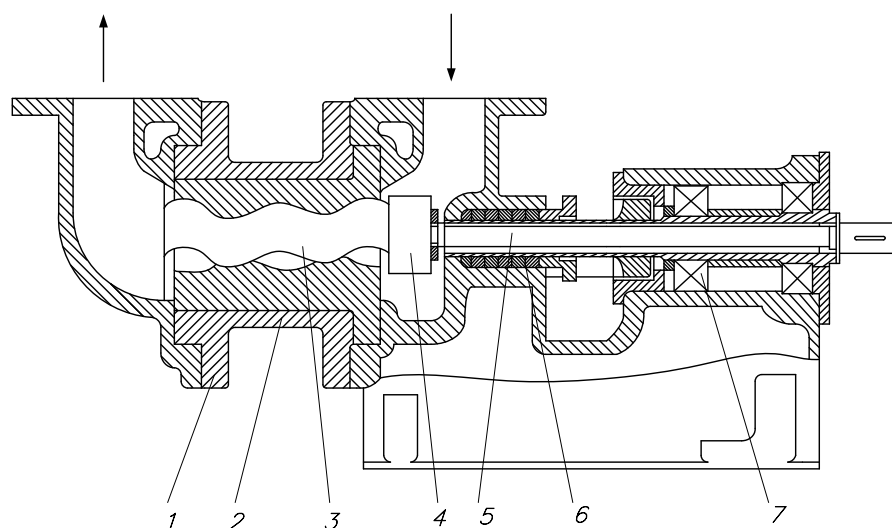


Рисунок 2.55 – Одновинтовой насос: 1 – корпус; 2 – обойма; 3 – винт; 4 – муфта; 5 – вал; 6 – уплотнение; 7 – опора с подшипниками

Шаг винтовой поверхности обоймы равен удвоенному шагу рабочего винта. Благодаря такому профилю обоймы и винта обеспечивается непрерывное перемещение рабочей среды при вращении винта.

Материал винта – сталь, чугун; материал обоймы – резина, пластмасса, керамика, металл. Производительность одновинтовых насосов, изготавливаемых ООО «Московский насосный завод», колеблется от 5 до 25 м³/ч, давление – от 3 до 20 кг/см².

Выбор арматуры является ответственным моментом проектирования трубопроводной системы, поскольку от ее надежности во многом зависит надежность работы всей системы. В общем случае выбор арматуры производят в таком порядке:

- уточняют условия работы – характеристику и свойства транспортируемой среды, температуру, давление эксплуатации;
- определяют условный диаметр;
- уточняют метод управления – с использованием ручного, электро-, гидро- или пневмопривода;
- с учетом коррозионных свойств среды выбирают конструкционные материалы изделия;
- выбирают класс арматуры – запорная, регулирующая, предохранительная и т.д.;
- назначают тип арматуры – вентиль, задвижка, кран, регулирующий или предохранительный клапан;

- уточняют условный диаметр прохода и диаметр отверстия в седле, для чего устанавливают допустимое гидравлическое сопротивление, коэффициент пропускной способности, расходную характеристику и т.д.

- с использованием данных о номенклатуре выпускаемой арматуры по каталогам выбирают соответствующее изделие.

В установках метанового сбраживания на линиях исходного сырья и жидких продуктов ферментации наибольшее распространение получили задвижки общетехнического назначения – двухдисковые параллельные с выдвижным штепселем, фланцевые чугунные с ручным или электрическим приводом.

Однако, как показала практика, на трубопроводах исходного сырья и отферментированной массы до ее разделения наиболее эффективно использование шланговой арматуры, в которой регулирование и отключение потока среды осуществляется пережатием эластичного шланга. Шланг обеспечивает герметичность всей внутренней полости арматуры, и проходное сечение такой арматуры не создает очагов скопления осадка.

На транспортных линиях биогаза используется арматура, которая широко применяется в газовой и нефтеперерабатывающей промышленности. Наиболее целесообразно использование шаровых кранов, которые имеют малые габариты, малое гидравлическое сопротивление и высокие эксплуатационные качества, благодаря чему они получили широкое распространение на трубопроводах с различными средами, включая метаносодержащие газовые среды с примесями диоксида углерода и сероводорода.

Глава 3. ЭФФЕКТИВНЫЕ ЗАРУБЕЖНЫЕ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ БИОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ

В успешно действующих биогазовых установках реализованы специальные технологические и конструктивные решения, такие как двухступенчатое сбраживание, многоаппаратная схема предварительной обработки и подготовки исходного сырья, введение активной биомассы, использование иммобилизационных материалов, рекуперативных теплосберегающих аппаратов, оборудование фракционирования сброженной массы и др., которые учитывают особенности сложного процесса метанового сбраживания и обеспечивают высокую эффективность работы этих установок в течение многих лет. Ниже приведены примеры успешной реализации биогазовых технологий в Украине и за рубежом.

3.1 Установка с двухступенчатой системой сбраживания фирмы «Швартинг»

Специалистами фирмы «Швартинг» и Института поверхностной и биологической технологии Фраунгоферского научного общества (г. Штутгарт) разработан метод двухступенчатого сбраживания, по которому основные стадии производства биогаза – кислое и метановое брожение – проходят в отдельных резервуарах [1]. Подобная организация процесса создает наилучшие условия для жизнедеятельности специфических микроорганизмов, действующих на каждой из стадий. Кроме того, двухступенчатый метод обеспечивает стабильный термофильный режим брожения на второй стадии. Благодаря этому существенно увеличивается скорость разложения биомассы в стадии метанообразования. Обычный недостаток термофильного брожения – увеличение потребления энергии на собственные нужды установки – устраняется с помощью системы рекуперации тепла, когда нагрев сырья на первой стадии происходит за счет тепла субстрата, имеющего температуру 55 °С после второй стадии сбраживания.

Принцип работы установки фирмы «Швартинг» состоит в следующем (рис. 3.1). Жидкий навоз поступает в навозосборник 1. Погружной насос 2 гомогенизирует содержимое навозосборника и измельчает находящиеся в нем крупные частицы, после чего субстрат с помощью эксцентрикового насоса 3 подается в аппарат 4 на первую стадию процесса. После выдержи-

ки в течение нескольких дней, за которые субстрат проходит по ферментеру снизу вверх, субстрат поступает во второй ферментер 5, откуда после технологической выдержки в течение 1–6 дней (в зависимости от вида субстрата) перекачивается насосом 6 через систему рекуперации тепла 7 в емкость для хранения 8. Песок и другие взвешенные вещества, попадающие в установку, выводятся из нее насосом 9, встроенным в основание первой камеры. Образующийся газ направляется через пеноуловитель 10 и гравийный фильтр 11 в объемный газомер 12, затем в газовый резервуар 13, где хранится до использования. Обогрев метантенков происходит с помощью трубчатого водяного теплообменника 14. Отопительные системы снабжены электронным регулятором 15, который поддерживает постоянную температуру 35 °С на первой стадии процесса и 55 °С – на второй. Встроенный в первую камеру теплообменник 7 позволяет обогреть ее теплом субстрата второй стадии, причем затрачиваемая энергия эквивалентна количеству теплоты, необходимому для подогрева жидкого навоза в одноступенчатых мезофильных установках. Для перемешивания содержимого камер разработана специальная гидравлическая система, которая перемещает бродящую массу вверх и вниз через заданные промежутки времени, пропуская ее через специальные листы с отверстиями, установленные на разных уровнях камеры. Таким способом достигается хорошее перемешивание субстрата, а также устраняется образование плавающих корок на поверхности жидкости. Свежий субстрат аккуратно перемешивается на дне резервуара, не распространяясь по всему объему. За счет этого снижается вероятность преждевременного вывода свежего несброженного субстрата из реактора, что важно как для увеличения степени разложения органического вещества, так и для инактивации патогенных микроорганизмов. Кроме того, благодаря такой системе перемешивания происходит отделение взвешенных твердых частиц от прикрепившихся к ним пузырьков газа. Это обеспечивает осаждение взвешенной фазы и увеличивает время выдерживания в метантенке твердых, медленно разлагающихся частей органического вещества.

Двухступенчатая технология сбраживания, разработанная фирмой Швартинг, обладает следующими преимуществами:

- кислород, неизбежно попадающий в установку со свежим субстратом, поглощается на первой стадии семианаэробными микроорганизмами

и не оказывает вредного влияния на строго анаэробную метаногенную микрофлору второй стадии;

- на каждой отдельной стадии возможно регулирование интенсивности перемешивания и времени технологической выдержки;

- достигается стабилизация температурного режима сбраживания: термофильного – на второй стадии процесса, мезофильного – на первой. В одноступенчатых термофильных установках чувствительность микроорганизмов к ударным тепловым нагрузкам столь велика, что это осложняет ведение технологического процесса;

- время технологической выдержки во второй стадии при 55 °С в зависимости от субстрата составляет от 1 до 8 дней.

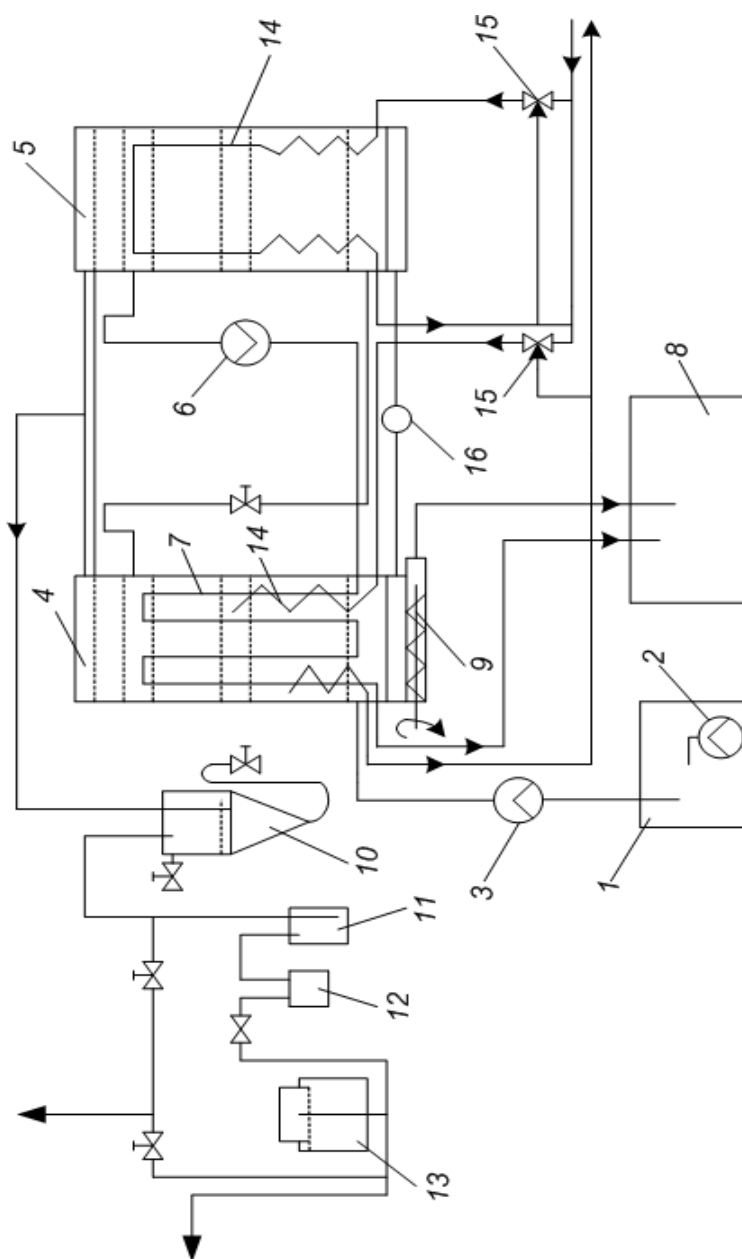


Рисунок 3.1 – Технологическая схема двухступенчатой биогазовой установки
фирмы «Швартинг»

1 – навозосборник; 2 – погружной насос; 3 – эксцентриковый насос; 4 – реактор 1-й стадии; 5 – реактор 2-й стадии; 6 – насос; 7 – система рекуперации тепла; 8 – резервуар для хранения сброженной массы; 9 – насос для отвода твердых компонентов; 10 – пеноуловитель; 11 – гравийный фильтр; 12 – объемный газометр; 13 – резервуар для хранения газа; 14 – теплообменник; 15 – электронный регулятор температуры

3.2 Установка комплексной переработки навоза фирмы «Конструмекс»

Заслуживает внимания комбинированная система переработки навоза, действующая в сельскохозяйственном кооперативе в Демшед (Венгрия) [2]. Установка (рис 3.2) ежедневно перерабатывает 200 т отходов коровника, свинофермы и населенного пункта и работает следующим образом.

Жидкий навоз по каналу 1 через решетку 2 направляется самотеком в приемник 3, откуда с помощью насоса-измельчителя 4 подается в шнековый разделитель фаз 5 – медленно вращающийся перфорированный барабан с внутренней направляющей спиралью.

Жидкая фаза после разделителя фаз 5 насосом 17 подается в фильтр 18, откуда жидкость с содержанием сухого вещества не менее 1 % поступает в дополнительный разделитель фаз 21. После разделителя жидкая часть с содержанием сухого вещества около 0,3–0,5 % по трубопроводу 24 подается в аэратор 25, оборудованный аэраторными мешалками 26.

Аэрированная жидкость с помощью насосов 27 подается в систему подпочвенного орошения посевных культур. Сгущенный навоз после разделителя фаз 5 с содержанием сухого вещества около 15 % проходит через рекуператор тепла отферментированной массы 6, нагреватель 7 и по трубопроводу 12 подается снизу в центральную часть метатенка 8. В процессе переработки исходный навоз движется от центра метатенка к периферии и снизу вверх к выгрузочному устройству 13 по специальному каналу, образованному перегородкой 10. Температурный режим сбраживания (34 ± 2 °C) обеспечивается с помощью рубашки обогрева. Насосом 11 сбраживаемая масса с середины метатенка периодически подается в верхние слои бродящей массы для разрушения корки и в нижние слои – для взмучивания осадка. Сброженная масса через выгрузочное устройство 13 поступает в рекуператор тепла 6 и далее в разделитель фаз сброженной массы 15.

Жидкая часть отферментированной массы насосом 16 подается в фильтр жидкой фазы 19 и далее в дополнительный разделитель 21 и аэратор 25. Твердая часть отферментированной массы из разделителя фаз 15 транспортером 28 подается на склад биоудобрений 29. Образующийся в метатенке биогаз по трубопроводу 32 через гидрозатвор 30, водяной очиститель биогаза от CO₂ 34, газовый фильтр-обезвоживатель 35 компрессором 37 подается в сборник газа 38, где дополнительно обезвоживается и

через сборник 40 поступает на потребление.

Установка оснащена замкнутой системой теплоснабжения, состоящей из котла 42, насоса 43 и трубопроводов, соединяющих нагревательные элементы 9 метатенка, подогреватель навоза 7, а также сборники биогаза 38 и 40.

Особенностью данной схемы является то, что установка обеспечивает утилизацию органических отходов с очень низким содержанием сухого вещества (0,3–0,5%), которые не проходят стадию метанового сбраживания, а обеззараживаются аэробным методом и используются для орошения посевных культур. Густая фракция навоза с содержанием сухого вещества до 15–20 % утилизируется путем метанового сбраживания с образованием биогаза и биоудобрений.

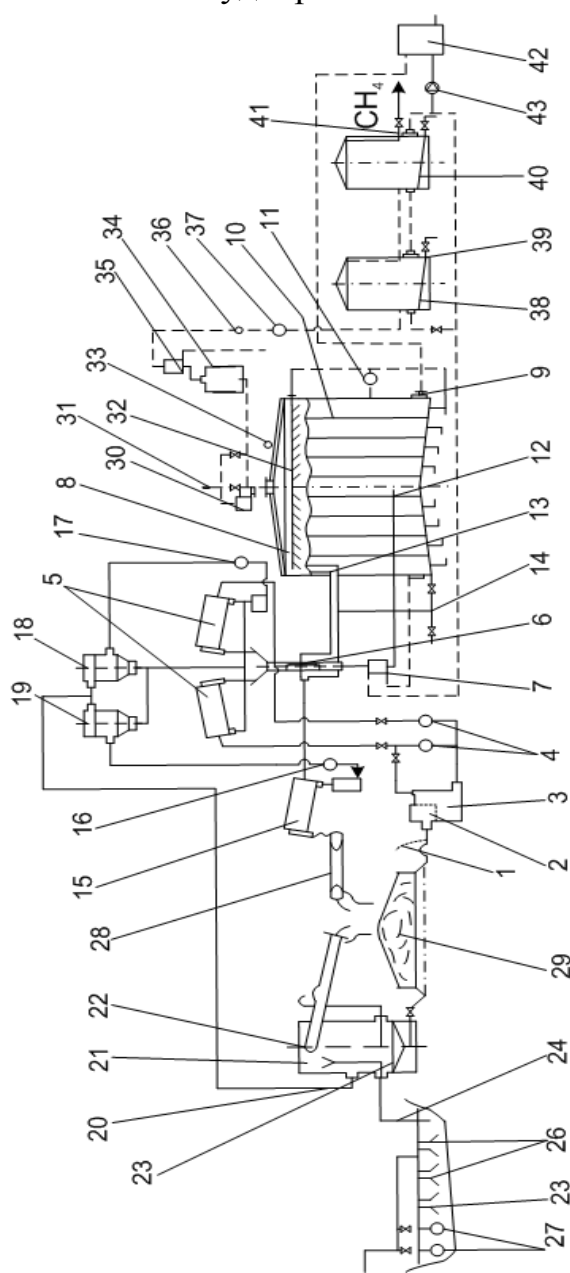


Рисунок 3.2 – Технологическая схема биогазовой установки фирмы «Конструмекс»

1– канал; 2– решетка; 3– приемник; 4– насос -измельчитель; 5– разделитель фаз исходного навоза; 6– рекуператор тепла сброженной массы; 7– дополнительный нагреватель; 8– метатенк; 9– система обогрева метатенка; 10– направляющая перегородка; 11– насос; 12– трубопровод загрузки метатенка; 13– выгрузочное устройство истантенка; 14– опорожнение днища; 15– разделитель фаз сброженной массы; 16– насос; 20– жидкая фаза сброженной массы; 21– дополнительный разделитель фаз; 22– переливная труба; 23– отвод ила; 24– отвод очищенной жидкой фазы; 25–аэрактор; 26– аэрационная мешалка; 27– насосы орошения; 28– транспортёр; 29– сборник сброженной массы (биоудобрения); 30– гидрозатвор; 31– гаситель пламени; 32– трубопровод CH_4 ; 33– манометр; 34– водяной очиститель газа; 35– газовый фильтр, обезвоживатель; 36– газовый счетчик; 37– газовый компрессор; 38– сборник газа, обезвоживатель газа; 39– отвод конденсированной воды; 40– сборник газа; 41– газовый трубопровод; 42– котел (для нагрева воды); 43– циркуляционный насос тепловой воды

3.3 Биогазовая установка фирмы BVT

Австрийская фирма BVT [3] изготавливает биогазовые установки для переработки отходов птицефабрик и ферм крупного рогатого скота. На рис. 3.3 показана технологическая схема установки по переработке 45 м³/сут экскрементов от 50000 кур и 700 голов крупного рогатого скота.

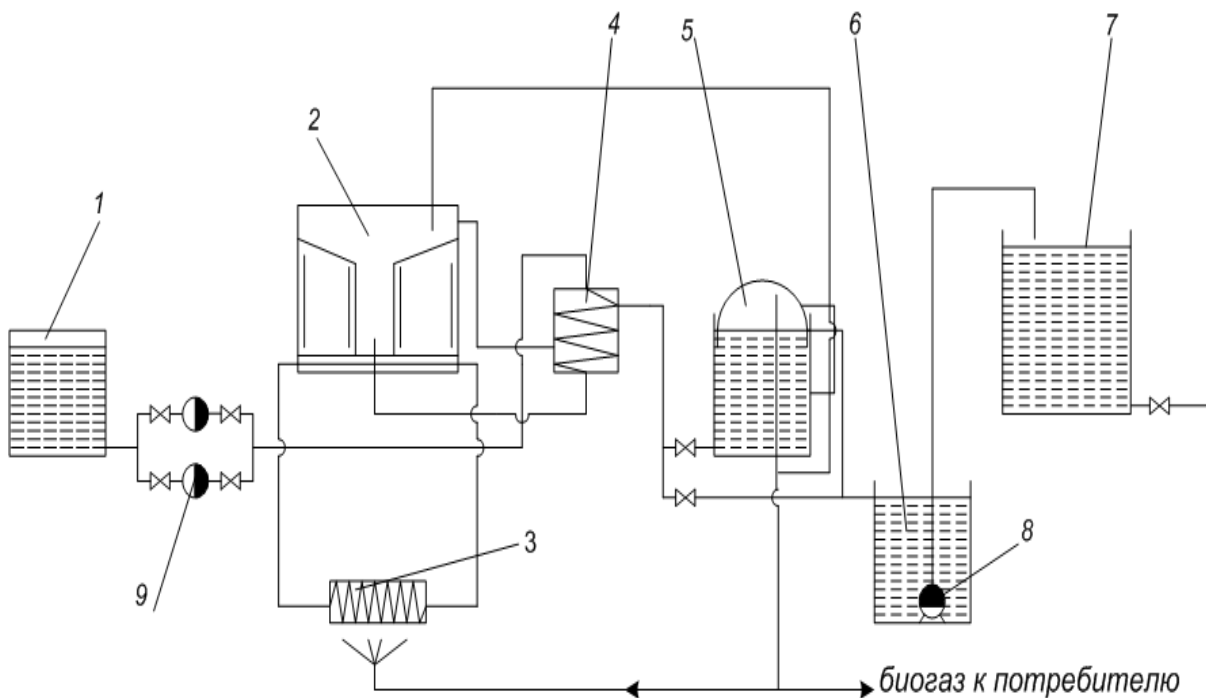


Рисунок 3.3 – Технологическая схема установки фирмы BVT:

1 – емкость; 2 – метатенк; 3 – газовый подогреватель; 4 – рекуператор-подогреватель; 5 – дображиватель-газгольдер; 6 – емкость; 7 – система подготовки жидких органоминеральных удобрений; 8, 9 – насосы

При полезном объеме метатенка 1800 м³ выход биогаза в сутки составляет 1800 м³, что эквивалентно 1000 кг котельного топлива.

Установка работает следующим образом. Смесь из куриного помета и навоза КРС готовится в емкости 1, откуда насосами 8 подается в трубное пространство подогревателя-рекуператора 4, а затем – в метатенк 2. Температура ферментации поддерживается за счет естественной циркуляции массы в контуре метатенк-газовой подогреватель 3. Отферментированная масса с температурой 50–60°C выгружается через межтрубное пространство рекуператора-подогревателя 4 в дображиватель-газгольдер 5. Дображенная масса через перелив выгружается в сборник отферментированной массы 6 и далее в систему подготовки жидких органоминеральных удоб-

рений 7. Биогаз, образовавшийся в метатенке 2, поступает в дображиватель-газгольдер 5, где накапливается, а затем подается на сжигание в газовый подогреватель 3 или другому потребителю.

Особенностью данной установки является следующее:

- использование в технологии процессов естественной циркуляции биомассы, что позволяет сократить количество применяемого вспомогательного оборудования (насосов, задвижек);
- совмещение функций разного оборудования в одном аппарате, а именно: газгольдер является одновременно дображивателем, подогреватель исходного сырья – рекуператором тепла сброженной массы;
- мокрый газгольдер заполнен теплой ферментной массой, а не водой, что исключает необходимость его дополнительного обогрева.

3.4 Установка с секционированным горизонтальным метатенком

В свиноводческом комплексе совхоза «Огре» (Латвия) эксплуатируется биогазовая установка, предназначенная для переработки навозных стоков свиноводческой фермы «Папардес» с содержанием на 3000 голов животных [4]. Установка (рис.3.4) состоит из двух биореакторов 3 емкостью 75 м³ каждый. Навозные стоки собирают из пяти свинарников и трактором загружают в емкость для свежего навоза 1, а затем насосом подают в емкость предварительного подогрева 6. Нагретые стоки насосом перекачивают в биореактор, где происходит их сбразивание при температуре 54 °С. Биогаз из верхней части реактора отводится в газгольдер 4, откуда по трубам подается в специально переоборудованный котел КВ-300М 5, где сжигается с помощью инжекционных горелок низкого давления.

Полученным в котле паром нагревают воду в бойлере 7, откуда ее насосом подают в трубы змеевикового теплообменника биореактора для поддержания в нем стабильной температуры. Теплую воду направляют также на обогрев помещений свинофермы. Сброженный навоз выводится из биореактора 3 в емкость 2, откуда трактором вывозится на поля.

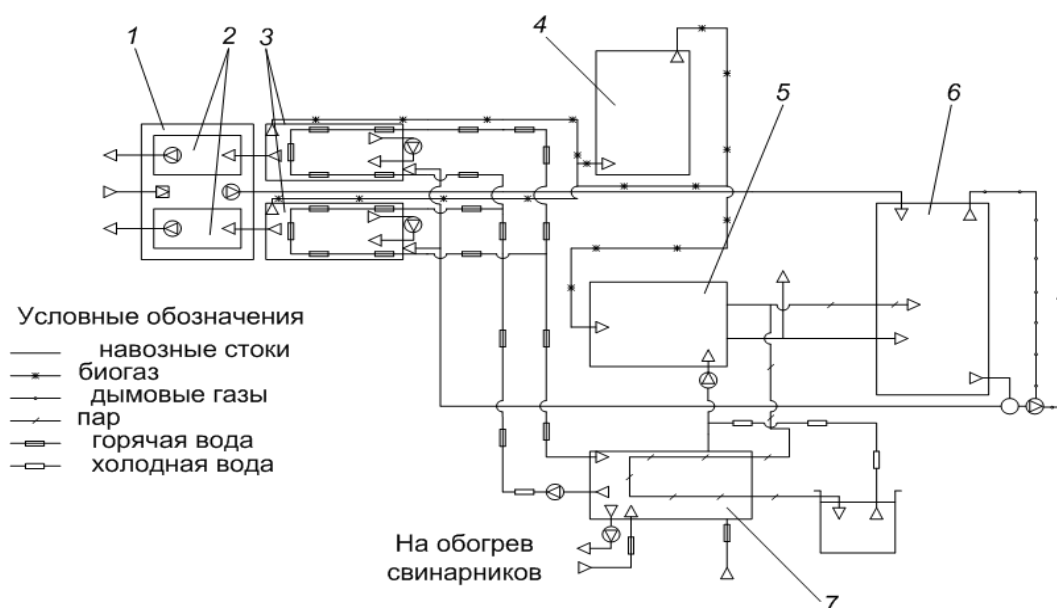


Рисунок 3.4 – Принципиальная технологическая схема биогазовой установки фермы «Папардес» совхоза «Огре»: 1 – емкость для свежего навоза; 2 – емкость-сборник перебродившего шлама; 3 – биореактор; 4 – газгольдер; 5 – котел; 6 – емкость для подготовки навоза; 7 – бойлер

Для уменьшения потерь тепла биореакторы, трубопроводы подачи навоза, а также емкость предварительного нагрева сырья теплоизолированы.

На рис. 3.5 приведены данные о произведенной и потребленной за сутки энергии в теплые и холодные месяцы 1984–1985 годов. Зимой 1984 года, когда работал только один биореактор и объем загруженных навозных стоков составлял 50 м^3 , потребление энергии на технологические нужды в январе составило 120,95 %, в феврале – 99,8 %. Это объясняется тем, что установка работала в термофильном режиме ($54 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) без утилизации тепла перебродившего шлама. Кроме того, свежие стоки подогревались острым паром, что снижало в них концентрацию сухого вещества и соответственно уменьшало выход биогаза.

В летние месяцы с целью стабилизации температурного режима сбраживания в теплообменник метантенка подавали горячую воду. Это обеспечило увеличение выхода биогаза практически в 2 раза. В связи с тем, что температура свежего навоза была существенно выше, чем зимой, потребление энергии на технологические нужды установки значительно снизилось и составило в июле – 40,2 %, а августе – 34,0 %.

После пуска второго биореактора и установки дополнительного теплообменника для утилизации тепла перебродившего шлама потребление

энергии на технологические нужды установки в 1985г составило: в январе – 52,19 %, феврале – 59,66 %, в июле – 48,57 %, августе – 36,01 %. Таким образом, реконструкция установки позволила даже в самые холодные месяцы года значительную часть производимой энергии (до 3000 МДж/сутки) использовать для нужд свинофермы

3.5 Биоэнергетическая установка «КОБОС»

Установка «КОБОС» К-Р-9-1 – первая серийно изготавливаемая БЭУ в Украине и бывшем СССР – была разработана Запорожским институтом КТИСМ (ныне ИМЖ УААН) [5]. Комплект оборудования «КОБОС» спроектирован по блочно-модульному типу, что позволяет в короткие сроки произвести строительные-монтажные работы и пуск установки. Технология сбраживания – двухступенчатая, режим работы – непрерывный, с ручным и автоматическим управлением. Продолжительность сбраживания навоза – 5–20 суток, сброженная масса является качественным биоудобрением. Биогаз может использоваться когенерационно в автономном энергоблоке, в отопительных системах, двигателях-генераторах электроэнергии и др.

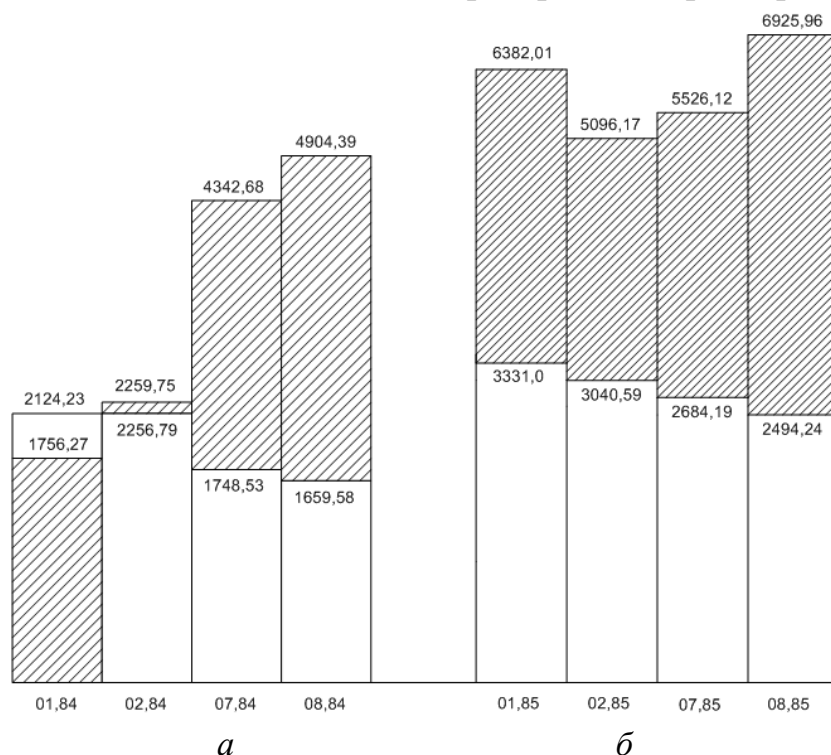


Рисунок 3.5 – Количество произведенной и потребленной (не заштриховано) за сутки энергии (МДж), в теплые и холодные месяцы года: *a* – работал один реактор с загрузкой 50 м³ сырья; *б* – работали оба реактора с общим объемом загрузки сырья 100 м³

Энергетический потенциал БЭУ составляет более 180 тыс. м³ биогаза в год, что эквивалентно 150 тыс.л/год условного топлива или бензина. За счет комбинирования однотипного оборудования, в первую очередь, реакторов, комплект К-Р-9-1 «КОБОС» может использоваться достаточно широко – для ферм с поголовьем КРС 400-800, свиней – 3–5 тысяч.

Технологический процесс в установке осуществляется следующим образом. Жидкий навоз из фермы 1 поступает в коллектор 3, откуда погружным насосом 2 подается в измельчитель 4 (ИНФ – 50) для измельчения длинноволокнистых включений растительного происхождения. Подготовленное сырье поступает в подогреватель-выдерживатель 5, где производится его подогрев до температуры сбраживания (30 °С), перемешивание с помощью насоса 6 и проходит первая стадия сбраживания навоза. Из подогревателя-выдерживателя навозная масса винтовым насосом-дозатором 7 подается в один из двух биореакторов 8, где проходит вторая стадия сбраживания при температуре 55 °С. Биогаз, полученный в реакторе, с помощью водокольцевого вакуум-насоса 21 через сухой газгольдер 18 подается на сжигание в котел 20. Сброженная масса самотеком поступает в сборник 19, откуда насосом 9 подается на дуговое сито 10 и пресс-фильтр 11 для разделения на жидкую и твердую фракции. Жидкие стоки поступают в навозохранилище 15, а затем с использованием системы орошения 17 или цистерн 14 применяются для удобрения посевов. Обезвоженный шлам транспортером 12 подается в автотранспорт 13 для вывоза на поля также в качестве удобрения.

3.6 Установка Биогаз 301С

На Сумском НПО им. М.В. Фрунзе в 1984 г. была спроектирована и построена биогазовая установка для подсобной свинофермы предприятия на 3000 голов с бесподстилочным содержанием животных и уборкой навоза механическим и гидравлическим способами. Принята двухступенчатая технология сбраживания и непрерывный режим работы установки. Технологический процесс реализуется по следующей схеме (рис.3.7) [6].

Из помещений свинофермы навоз поступает в сборник 1, откуда насосом 2 через ловушку 3 подается в подогреватель 4. В подогревателе, снабженном мешалкой и системой обогрева, исходный навоз тщательно перемешивается, подогревается до температуры сбраживания ($39 \pm 2^\circ\text{C}$) и вы-

держивается в этих условиях 8–9 часов; за это время завершается кислотогенная фаза метанового брожения. Подготовленное сырье насосом 5 подается в метатенк 6.

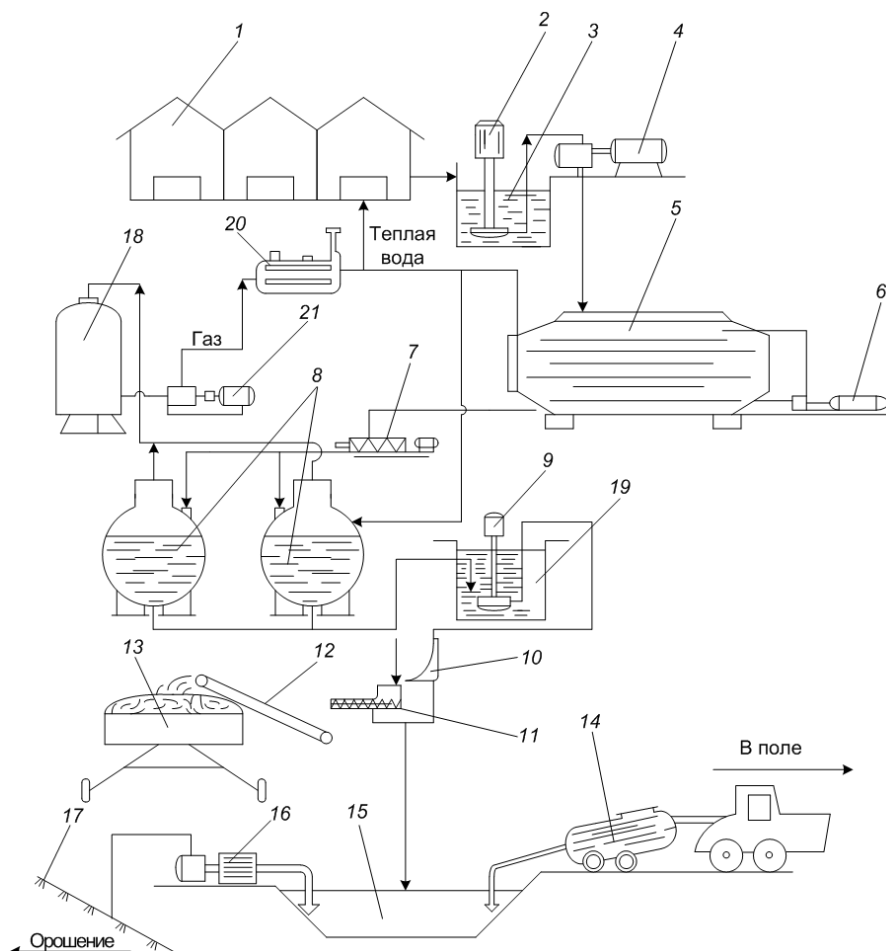


Рисунок 3.6 – Технологическая схема установки «КОБОС–1»:

1– ферма; 2– насос для жидкого навоза; 3– коллектор; 4– измельчитель; 5– подогреватель-выдерживатель; 6, 9 – фекальные насосы; 7–винтовой насос; 8– биореакторы; 10– дуговое сито; 11– пресс-фильтр; 12– транспортер; 13– тележка; 14–цистерна-расбрасыватель; 15– навозохранилище; 16– насос; 17–оросительная система; 18– газгольдер; 19– сборник; 20– котел; 21–компрессор.

Техническая характеристика установки КОБОС – 1.

Производительность по исходному сырью, м ³ /сут	30
Производительность по биогазу, м ³ /сут	500
Рабочая температура, °С	30; 55
Давление, МПа	0,098
Установленная мощность электрооборудования, кВт	50
Количество обслуживающего персонала, чел/смену	1
Габаритные размеры площадки для размещения комплекса, мм	30000×50000
Масса комплекса, кг	90000

В процессе заполнения метантенка и при дальнейшей догрузке новыми порциями сырья содержимое реактора периодически перемешивается насосом 5 и специальным перемешивающим устройством. Выгрузка отферментированной массы осуществляется через специальное переливное устройство в сборник-аэратор 7, где происходит насыщение ее кислородом с целью подавления деятельности анаэробной микрофлоры и улучшения санитарно-гигиенических показателей стоков.

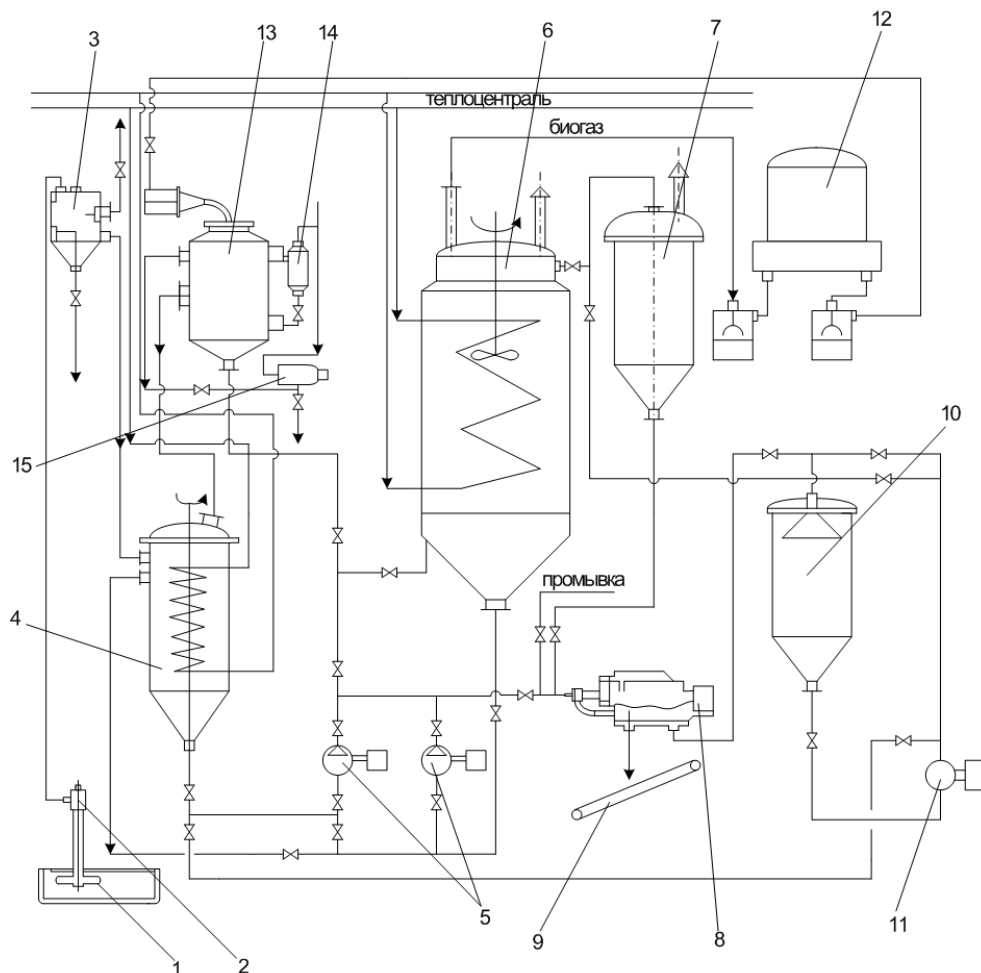


Рисунок 3.7 – Принципиальная технологическая схема установки «Биогаз-301С»: 1– сборник; 2 – насос; 3 – ловушка; 4 – подогреватель; 5 – насосы; 6 – метатенк; 7 – сборник-аэратор; 8 – центрифуга; 9 – транспортер; 10 – сборник жидкой фракции; 11– насос; 12 – газгольдер; 13 – газовый подогреватель; 14 – сепаратор; 15 – газодувка

Из сборника 7 сброженная масса самотеком подается на центрифугу 8 для разделения на фракции. Обезвоженный шлам транспортером 9 подается на автотранспорт для вывоза, а жидкая фракция – в сборник 10, откуда насосом 11 подается на поля в качестве жидкого удобрения или для про-

мывки трубопроводов, а при соответствующей доочистке – на гидросмыв в свиноферму. Образующийся в метатенке биогаз поступает в газгольдер 12, входной и выходной патрубки которого блокированы гидрозатворами и огнепреградителем.

Для обеззараживания навоза больных животных его необходимо нагревать до более высокой температуры, чем температура сбраживания. В этом случае используют газовый подогреватель 13, оснащенный горелкой, работающей как на биогазе, так и на природном газе. Процесс обеззараживания осуществляется следующим образом. При заполненном подогревателе 4 сырье насосом 5 подается в донный штуцер газового подогревателя 13. Жидкость в газовом подогревателе поднимается до уровня бокового переливного патрубка и самотеком стекает обратно в подогреватель 4. В газовую горелку подогревателя подается биогаз или природный газ. Горючие газы проходят через центральную трубу газового подогревателя и отдают свое тепло подогреваемому сырью. Охлажденные продукты сгорания биогаза отсасываются газодувкой 15. Постоянная циркуляция по схеме подогреватель 4 – газовый подогреватель 13, а также перемешивание сырья в подогревателе с помощью механической мешалки интенсифицируют процесс подогрева навоза до нужной температуры. Охлаждение обеззараженного сырья до температуры сбраживания перед подачей его в метатенку осуществляется в подогревателе 4 с помощью охлаждающей воды, которая подается в теплообменную систему подогревателя.

Техническая характеристика установки «Биогаз-301С»:

объем перерабатываемых стоков, м ³ /сут.	– 30
производство (в сутки):	
биогаза, м ³	– 450
твердых удобрений, т	– 5
жидких удобрений, м ³	– 25
потребляемая мощность, кВт·ч/сут.	– 150

Строительство установки «Биогаз-301С» на свиноферме, расположенной в черте города, обеспечило решение экологических проблем подсобного хозяйства Сумского НПО им. М.В. Фрунзе. Технические решения, принятые при проектировании установки, позволили реализовать на ферме безотходный цикл выращивания животных. В частности, использование центри-

фуги ОГШ усовершенствованной конструкции – ОГШ500K04 – дало возможность снизить влажность твердой фракции сброженной массы на 20 % по сравнению с фракцией, полученной на стандартной центрифуге. Это значительно улучшило физико-химические характеристики биоудобрения, что позволило непосредственно, без дополнительной обработки, вносить его в почву. Впоследствии при проектировании БЭУ для свинокомплексов Краснопольского, Лебединского и других районов Сумской области конструкция установки «Биогаз-301С» была использована как базовая.

3.7 Установка Биогаз 5-61С

По проекту НПП «Агробιοтехнология» в Харьковской области строится централизованная установка «Биогаз 5-61С». Она предназначена для переработки 50 т/сут. отходов КРС и птицы от окрестных фермерских хозяйств [7].

Установка включает в себя:

- узел подготовки исходного сырья;
- блок метатенков;
- систему сбора биогаза;
- узел подготовки горячей воды для технологических нужд установки и горячего водоснабжения фермы;
- узел разделения отферментированной массы;
- узел приготовления жидких органо-минеральных удобрений.

Технологический процесс осуществляется по схеме, показанной на рис.3.8. Навоз влажностью от 78 % до 92–93 % с подстилочным материалом или без него загружается в подготовительную емкость 1, где разбавляется (при необходимости), перемешивается, отделяется от подстилочного материала (соломы). Для разбавления используется вода или жидкие стоки, полученные после разделения отферментированной массы. Из емкости 1 исходное сырье в объеме дозы разовой загрузки погружным насосом 2 через ловушку 3 загружается во внутреннюю полость 4 дозатора-рекуператора тепла. Здесь исходное сырье подогревается теплой водой до температуры ферментации и с помощью насосов 6 через коллектор всасывания 7 и коллектор нагнетания 8 перекачивается поочередно в каждый метатенк (М1-М5). Одновременно из загружаемого метатенка по линии перелива 9 отферментированная масса самотеком поступает в наружную

полость 5 дозатора-рекуператора тепла; одновременно во внутреннюю полость дозатора 4 загружается новая доза исходного сырья. При этом за счет теплообмена происходит подогрев исходного сырья и охлаждение отферментированной массы. С целью интенсификации процесса рекуперации тепла исходное сырье периодически перемешивается с помощью мешалки. Охлажденная отферментированная масса с помощью насосов 10 подается в сборник 11, откуда ее либо подают на центрифугу 13 для разделения на жидкую и твердую фазы, либо направляют в смеситель 14 для приготовления жидких органико-минеральных удобрений. Приготовление удобрений в смесителе 14 осуществляется путем введения в обеззараженную отферментированную массу солей, содержащих фосфор, азот и калий из бункера 15.

Отферментированная масса на центрифуге 13 разделяется на обезвоженный шлам, который транспортером подается на автотранспорт для вывоза, и жидкие стоки, самотеком поступающие в отстойник - накопитель.

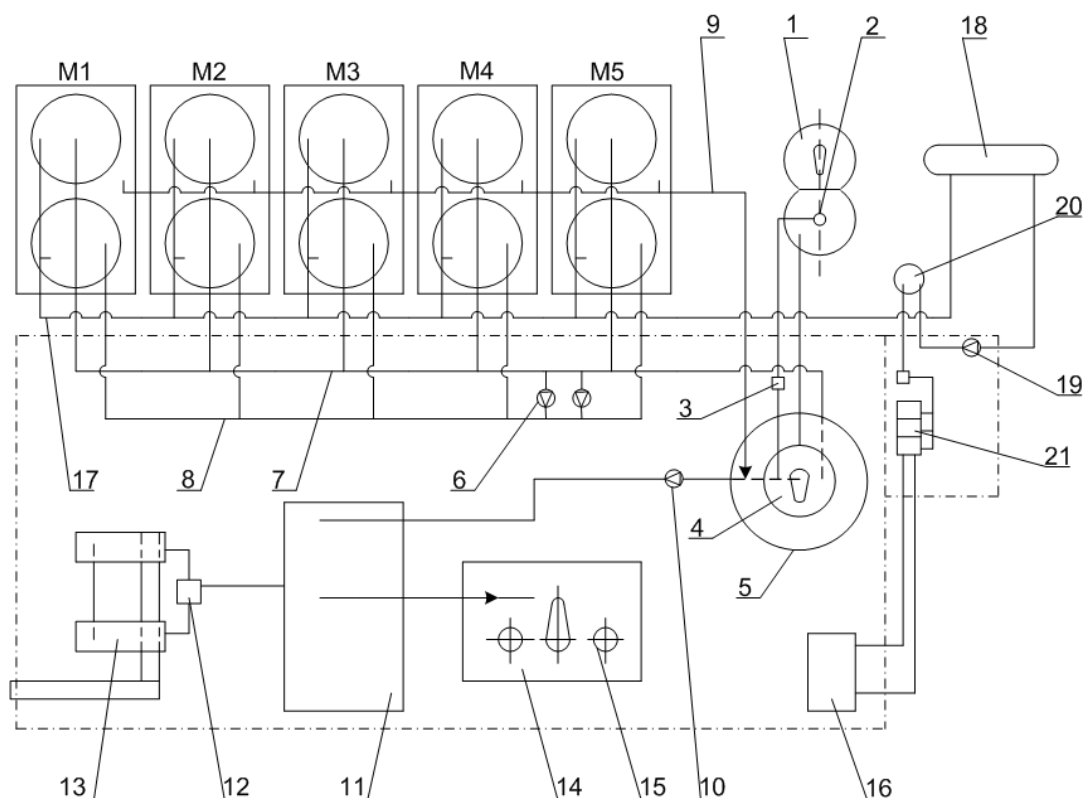


Рисунок 3.8 – Принципиальная технологическая схема установки «Биогаз 5-61»:
1– подготовительная емкость; 2– погружной насос; 3 – ловушка; 4 – внутренняя полость дозатора-рекуператора; 5 – наружная полость дозатора-рекуператора; 6 – насос; 7– коллектор всасывающий; 8 – коллектор нагнетательный; 9 – коллектор перелива; 10 – насос; 11– бак напорный; 12 – ловушка; 13 – центрифуга; 14 – смеситель; 15 – бункер; 16 – узел приготовления горячей воды; 17– коллектор биогаза; 18 – сборник биогаза; 19 – вакуум-компрессор; 20 – ресивер; 21– водогрейный котел

Исходное сырье, загруженное в метатенки, смешивается с имеющейся в них ферментной массой. Перемешивание обеспечивается насосами 6, а разрушение корки – за счет гидравлического удара при загрузке, выгрузке и перемешивании жидкости. Последовательность и время выполнения операций определяется технологическим регламентом.

Биогаз, образовавшийся в процессе сбраживания, накапливается в газовых полостях метатенков, из которых по общему коллектору 17 подается в сборник газа 18. Из сборника биогаз с помощью вакуум-компрессора 19 отсасывается в ресивер 20 и используется для сжигания в водогрейных котлах 21 теплоснабжения. Полученная в котлах горячая вода используется в качестве теплоносителя для систем обогрева дозатора-рекуператора и метатенков, а также для горячего водоснабжения помещений фермы.

Оборудование установки может работать в любом из трех температурных режимов (35–38 °С, 40–42 °С, 50–52 °С) по одностадийной или двухстадийной схеме.

В процессе эксплуатации могут одновременно использоваться все метатенки или часть метатенков в зависимости от обстоятельств (ремонт, отсутствие необходимого количества исходного сырья и т.п.).

3.8 Международные проекты биогазовых установок в Украине

Первая крупная БЭУ в Украине была построена в 2003 г на свиноферме компании «Агро-Овен» в с. Еленовка Днепропетровской области в рамках проекта технической помощи правительства Нидерландов. Оборудование было поставлено компанией BTG (Нидерланды), проект выполнен в УкрНИИАгропроект, техническое сопровождение – совместно: BTG, УкрНИИАгропроект и НТЦ «Биомасса» [8]. Установка предназначена для обработки 80 т/сут свиного навоза с добавлением жировых отходов цеха забоя птицы. Она включает два метатенка по 1000 м³ каждый, две когенерационные установки мощностью по 80 кВт электрических и 160 кВт тепловых. Проектный выход биогаза – 3300 м³/сут при содержании сухого вещества (СВ) в загружаемых стоках 10–12 %. Схема установки представлена на рис. 3.9.

Метатенк имеет общий объем 1200 м³, из которых 1000 м³ заполнены навозом, 200 м³ – биогазом. Биореактор располагается ниже поверхности грунта на 2,5 м, общая высота конструкции – 3,6 м; занимаемая площадь – 335 м².

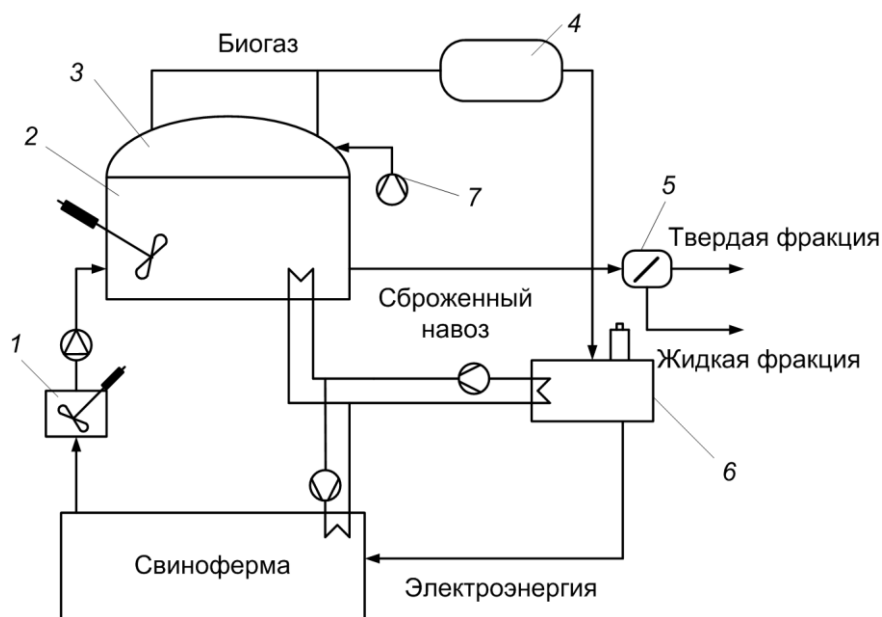


Рисунок 3.9 – Схема биогазовой установки фирмы BTG:

1 – смесительный резервуар; 2 – метантенк; 3 – пленочный газгольдер; 4 – система удаления сероводорода; 5 – сепаратор; 6 – когенерационная установка; 7 – сборник конденсата

Сбраживание осуществляется в мезофильном режиме (35 °C). Навоз поступает в метантенки из свинофермы через смесительную емкость. Для предотвращения расслоения бродящей массы в метантенке производится ее перемешивание механической мешалкой. Образующийся биогаз собирается в газгольдере, расположенном над поверхностью метантенка и выполненном из гибкой пластиковой пленки. Пленка состоит из двух слоев; внутренний слой устойчив к воздействию биогаза, наружный – выдерживает высокие механические нагрузки. В пространство между слоями пленки нагнетается воздух. Создаваемое небольшое избыточное давление (1,0–1,5 кПа) предотвращает деформацию купола метантенка от снега, ветра и др. Продукционный биогаз очищается от сероводорода, обезвоживается и подается в когенерационную установку, перерабатывающую газ в электрическую энергию, которая используется на нужды предприятия. Выхлопные газы от двигателя установки проходят через теплообменник и нагревают воду циркуляционного контура. Теплая вода используется для нагрева метантенка (около 50 % в зимний период), а ее излишек – для обогрева фермы.

Сброженный навоз поступает в сепаратор для разделения на жидкую и твердую фракции; жидкая фракция может перекачиваться на поля в качестве удобрения.

Имеется информация еще о нескольких внедренных проектах биогазовых установок. В частности, в п.г.т. Терезино (Киевская область) в 2009 г. внедрена установка (проект фирмы LIPP (Германия)), рассчитанная на переработку 60 м³ в сутки смеси навоза (90 % КРС и 10 % навоза свиней) стоков доильного цеха и отходов кормов. Рабочий объем реактора – 1500 м³. Режим сбраживания – мезофильный. Выход биогаза – 90 м³/ч; содержание метана – 50–65 %. Биогаз перерабатывается в когенерационной установке. Установленная электрическая и тепловая мощность КГУ соответственно 250 и 310 кВт. Выработанная энергия направляется на собственные нужды, в дальнейшем планируется продажа электроэнергии в сеть по «зеленому тарифу».

В том же 2009 г. в с. Б. Круполь (Киевская обл.) введена в эксплуатацию биогазовая установка (проект фирмы «ЗОРГ» (Украина)) по переработке 400 т/сут навоза КРС. Установлено два реактора объемом 2600 м³ каждый (третий реактор в стадии строительства). Температурный режим сбраживания – мезофильный. Среднее содержание метана в биогазе – 50–66 %. Установленная электрическая и тепловая мощность КГУ соответственно 625 и 686 кВт. Выработанная энергия направляется на собственные нужды.

Показатели работы некоторых украинских и зарубежных биогазовых установок приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики известных отечественных и зарубежных биогазовых установок

№ п/п	Показатели	Биогазовые установки									
		Дания фирма Клаухан	Латвия «Огре»	Украина «Биогаз 301С»	Украина Кобос-1	Украина «Биогаз 5-61С»	Эстония Пярну	Финляндия фирма Энбом	Голландия фирма BTG	Украина «Биогаз-402С»	Германия фир- ма «УТС-ГмбХ»
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	Исходное сырье: навоз КРС свиной навоз Влажность, %	– + 93–94	– + 93–94	– + 94–95	– + 93–95	– + 88–92	– + 93–94	– + 94–95	– + 88,4	– + 93–96	– + 92–94
2.	Производи- тельность по исходному сы- рью, м ³ /сут.	5	20	30	25	50	400	12	80	90	100
3.	Объем метантенка, м ³	80	75	300	125	60	3260	120	1000	400	880

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.	Количество метантанков, шт	1	2	1	2	5	2	1	2	2	2
5.	Время сбраживания, сут.	16	7,5	10	10	6	16	10	25	9	15
6.	Температура сбраживания °С	35	54	40÷42	40	40÷52	38	35÷40	32÷34	54÷55	40
7.	Давление биогаза в метантанке, кПа	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104
8.	Производительность по биогазу, м³/сут.	120	265	375	500	520	6200	160	3300	1300	1400
9.	Использование биогаза: тепловая энергия электроэнергия	+ –	+ –	+ –	+ +	+ –	+ –	+ –	+ +	+ –	+ +
10.	Выход биогаза с 1 м³ перерабат. сырья, м³/м³	24	13,25	12,5	11,2	10,4	15,5	13,3	41,25	14,5	14,0
11.	Производство удобрений: твердого жидкого без NPK жидкого с NPK	+ + –	+ + –	+ + +	+ + –	+ + +	+ + –	+ + –	+ + –	+ + –	+ + –

Глава 4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВОК МЕТАНОВОГО СБРАЖИВАНИЯ

Освоение новых технологических процессов неразрывно связано с проблемами изыскания материалов, способных обеспечить необходимые прочностные характеристики оборудования. Наряду с требованиями коррозионной стойкости, к конструкционным материалам предъявляются требования высокой механической прочности, свариваемости, сохранения пластических свойств в соответствующих реакционных средах под воздействием рабочих температур и давлений.

Для надежного выбора материала необходимо иметь информацию о влиянии на скорость коррозии основных компонентов среды и побочных продуктов, о поведении материала в условиях вибрации и при интенсивном движении потоков. Нужно учитывать также особенности эксплуатации оборудования, специфическую коррозию в узких местах, в узлах трения и др.

Возможность использования полимерных материалов для защиты от коррозии зависит, прежде всего, от их структуры, пористости, состава и температуры реакционной среды. В агрессивной среде могут происходить процессы диффузии отдельных ее компонентов в полимер, набухание полимера (вплоть до растворения) либо химическое взаимодействие со средой. При возникновении диффузии физические свойства материала не изменяются, он не разрушается. При набухании происходит увеличение объема и изменение физико-механических свойств полимера, поэтому в процессе эксплуатации оборудования необходимо осуществлять постоянный контроль над состоянием деталей, изготовленных из этого материала. При этом оценивают такие показатели, как кратковременная прочность, характеризующаяся пределом прочности, и предел выносливости – наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения материала после неограниченного количества циклов нагружения.

Использование строительных материалов (бетон, кирпич) в сооружениях метанового сбраживания требует применения специальных мер для герметизации оборудования и защиты его от разрушения. С этой целью для обработки стенок сборников, метантенков применяют растворы особых составов.

В данной главе приведены литературные данные о различных видах коррозии, возникающих в средах, подобных рабочим средам биогазовых реакторов, в сравнении с результатами собственных исследований авторов в области коррозионной стойкости материалов в рабочих средах аппаратов установки «Биогаз – 301С».

4.1. Коррозия стальных и железобетонных конструкций

Рабочие среды метантенков, имеющие густую консистенцию, высокую концентрацию различных, в том числе хлорсодержащих солей, значительное содержание диоксида углерода, оказывают негативное влияние на конструкционные материалы аппаратов.

В справочной литературе отсутствуют сведения о коррозионной стойкости материалов в подобных средах. В немногочисленных публикациях [1, 2, 3] рассматриваются вопросы коррозионной стойкости либо строительных конструкций животноводческих комплексов, либо оборудования для их обслуживания – приготовительных, кормораздаточных, навозоуборочных машин.

Так, в работе [2] изучались коррозионная стойкость алюминиевых сплавов, свойства анодно-оксидного покрытия, сплавов Al-Zn-Mg в воздухе помещения животноводческой фермы, характеризующегося высокой влажностью и содержащего аммиак, сероводород и ряд других газов. Характерный вид коррозии в этих условиях – питтинговый, с максимальной глубиной питтинга 0,6 мм. В работе [1] описаны результаты сравнительных испытаний коррозионной стойкости стали Ст.3 и цинка в животноводческих помещениях, дана оценка влияния процесса периодической конденсации влаги воздуха в присутствии сероводорода на показатели коррозии. Показано, что стальные конструкции корродируют со скоростью 0,02 – 0,15 мм/год. Отмечено, что одним из эффективных способов защиты стальных конструкций в данных условиях является горячее цинкование.

Авторы [3] наблюдали за образцами стали Ст 3 сп ГОСТ 380-94, Ст45 ГОСТ 1050-88 и серого чугуна СЧ 18-36 ГОСТ 1412-85 в условиях эксплуатации кормораздаточных машин, навозоуборочных транспортеров, ограждающих устройств в свинарниках-откормочниках. Указывается, что средние годовые потери веса образцов в атмосфере животноводческого помещения составляют для образца Ст 3 сп – до 570 г/м², стали 45 – до 450 г/м² и СЧ 18-36 – до 398 г/м². При этом главную опасность представляет питтинг, достигающий

глубины 0,8–1,5 мм/год, что резко уменьшает механическую прочность конструкций из тонколистовой стали. Обнаружено, что конструкционные материалы с более высоким содержанием углерода при циклических динамических нагрузках в условиях свиарников-откормочников подвержены коррозионному растрескиванию.

4.1.1. Электрохимическая коррозия металлов

Одним из наиболее агрессивных химических компонентов рабочих сред биогазовых установок является хлорид натрия, количество которого достигает 1300 мг/л.

В справочной литературе [4,5,6] приводятся данные по коррозионной стойкости углеродистых, низколегированных и нержавеющей сталей. При этом сообщаются данные только по общей коррозии, однако известно, что хлориды могут вызвать точечную коррозию и, как следствие, коррозионное растрескивание нержавеющей сталей. Коррозия углеродистой стали может ускоряться вследствие протекания местной коррозии.

Наличие в жидкостях ионов хлора (сильных депассиваторов) очень опасно для металлов, коррозионная стойкость которых обусловлена пассивным состоянием их поверхности. Ионы хлора вызывают локальные, местные нарушения пассивной пленки, что приводит к очень опасному виду коррозионных разрушений – точечной (питтинговой) коррозии. Интенсивно развиваясь, питтинг достигает заметной глубины и нередко переходит в сквозное отверстие. Это необходимо учитывать при выборе и применении металлов в средах, содержащих ионы хлора и другие депассиваторы.

Изучение влияния хлоридов на характер коррозии углеродистых сталей проводили на теплообменном оборудовании. Было установлено, что наибольший ущерб в этом случае наносит язвенная коррозия. В работе [7] оценивалась склонность углеродистой стали к язвенной коррозии по потенциалу питтингообразования φ_{no} , который определяется методом пробоя и по кривым ток-время, измеренным при постоянном потенциале. В качестве фонового был выбран нейтральный раствор боратного буфера ($0,2M H_3BO_3 + 0,05M Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$; pH = 7,35), анионы которого не принимают непосредственного участия в реакции анодного растворения железа. Потенциодинамические (1В/100 мин) анодные поляризационные кривые снимали при температуре 50 °С в перемешиваемых растворах бората, со-

держащих добавки NaCl и H₂SO₄. Часть измерений проводили в растворах, *продутых азотом*, и установили, что при концентрациях хлор-иона выше 5 мг/л наблюдается активация пассивного электрода, которая усиливается при повышении концентрации хлор-иона. Эта зависимость имеет логарифмический характер. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что при концентрации хлор-иона в оборотной охлаждающей воде выше 10 мг/л эффективным методом предотвращения язвенной коррозии теплообменного оборудования со стороны охлаждающей оборотной воды является продувка ее азотом. Найденные критические концентрации хлор-ионов нельзя рассматривать как константы, поскольку в реальных условиях действуют различные, большей частью не поддающиеся учету факторы, влияющие на развитие питтинговой коррозии. Например, сульфат-ионы при определенных концентрациях могут облегчить локальную активацию металла, смещая ϕ_{no} в область отрицательных значений.

Одной из причин быстрого разрушения теплообменной аппаратуры является образование термогальванических пар. Исследовано электрохимическое и коррозионное поведение железа (0,025 % C; 0,030 % S; 0,025 % P; 0,035 % Mn; 0,015 % P; 0,3 % Cu) в 3 %-ном растворе хлористого натрия в условиях, когда температура равна, выше или ниже температуры раствора. Возникновение термогальванических элементов в неизометрических условиях определяется температурными изменениями потенциалов коррозии металла. Рассмотренные данные о температурной зависимости потенциала коррозии железного электрода, подтвержденные результатами модельных опытов, показывают, что в неизометрических коррозионных системах Fe – 3 %-ный раствор NaCl тепловая нагрузка неоднозначно влияет на полярность термогальванических элементов [8]. Наличие положительных тепловых потоков на горячем участке не изменяет полярности нормальных макропар. В режиме теплопередачи от раствора холодный электрод выполняет в макропаре не катодную, а анодную функцию.

В литературе приводятся данные и о коррозионной стойкости нержавеющих сталей в средах, содержащих ионы хлора. В работе [9] отмечается случай питтинговой коррозии на трубопроводах, изготовленных из стали 12X18H10T под действием речной воды, содержащей 150–250 мг/л Cl⁻, 30–120 мг/л H₂SO₄, 0,3–1,13 мг/л Cl₂, солей – 200–400 мг/л, pH = 8–8,5.

Известно, что даже небольшая концентрация диоксида углерода в воде

(1,2 мг/л) вызывает значительную скорость коррозии (0,035 мм/год) углеродистой стали (Ст.45) [10].

Установлено, что уголекислотная коррозия стали протекает со смешанной диффузионно-кинетической поляризацией. Процесс водородной деполяризации осуществляется двумя основными путями:

- ионами гидроксония из глубины раствора;
- ионами водорода, выделяющимися в результате образования и диссоциации угольной кислоты на корродирующей поверхности металла и в непосредственной близости от нее [11].

При низких давлениях CO_2 ввиду малой концентрации растворенного диоксида углерода и большой подвижности ионов гидроксония в уголекислотном коррозионном процессе преобладает деполяризация ионами водорода из адсорбированной угольной кислоты. Уголекислотная коррозия малоуглеродистой стали при давлении CO_2 0,1МПа в конденсационной воде в статических и динамических условиях протекает с катодным контролем. При этом анодный процесс протекает практически беспрепятственно. Скорость уголекислотной коррозии с повышением температуры от 25 до 80 °С возрастает примерно в 3 раза [11].

Однако в работе [12] указано, что образующийся в растворе продукт уголекислотной коррозии стали $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, подвергаясь гидролизу, подщелачивает среду; при этом происходит торможение не только анодного, но и катодного процессов.

При уголекислотной коррозии сталь подвергается наводороживанию, что приводит к ее растрескиванию; при этом наибольшее влияние на наводороживание стали в уголекислотной среде оказывает повышение температуры. При содержании водорода в стали ВСт 3 сп более 3 см³/100г металла происходит значительное (более 10 %) уменьшение прочностных свойств стали.

Если в воде присутствует диоксид углерода, то протекают следующие реакции:

- образование угольной кислоты:



- взаимодействие угольной кислоты с гидроксидом железа (II) $\text{Fe}(\text{OH})_2$:



Гидроксид железа (II) образуется при взаимодействии Fe^{+2} с ионами

ОН⁻, присутствующими в воде:



Fe(OH)₂ откладывается на металле в виде пленки, которая могла бы служить защитной, но она растворяется угольной кислотой с образованием хорошо растворимого гидрогенокарбоната железа (II) Fe(HCO₃)₂.

Значительное повышение скорости коррозии вызывается водами, содержащими СО₂ и О₂, при их нагревании. Так, скорость коррозии в дистиллированной воде при нагреве от 60 до 90 °С в присутствии только О₂ возрастает примерно в 2 раза, а в присутствии только СО₂ – в 2,5 раза. [13]. В присутствии обоих газов величина скорости коррозии находится между этими двумя значениями.

Присутствие кислорода в электролите ведет к усилению его окислительных свойств, причем кислород увеличивает скорость коррозии до тех пор, пока его концентрация не достигнет величины, достаточной для пассивирующего действия окисной пленки; после этого скорость коррозии резко снижается. Неравномерное поступление кислорода на поверхность металла увеличивает скорость коррозии на некоторых ее участках и вызывает щелевую коррозию – разрушение металла в узких зазорах и щелях.

4.1.2. Биохимическая коррозия металлов

В последнее время коррозия металлических и неметаллических материалов стала объектом исследования не только материаловедов и электрохимиков, но и микробиологов. По данным [14] более 50 % коррозионных разрушений трубопроводов может быть отнесено за счет деятельности микроорганизмов. В нефтедобывающей промышленности 80 % коррозионных разрушений осуществляется сульфатредуцирующими бактериями. Ущерб от биохимической коррозии изделий и сооружений составляет ежегодно около 3 % от их производства. Наиболее активными коррозионными агентами являются тионовые и нитрифицирующие бактерии, создающие кислые агрессивные среды. Сульфатредуцирующие бактерии – основной агент анаэробной биокоррозии – гетеротрофные микроорганизмы, образующие коррозионно-активные метаболиты (NH₃, СО₂, H₂S, органические кислоты).

В рабочих средах установок метанового сбраживания имеются все условия для развития всевозможных бактерий, в том числе и коррозионно-

активных, а именно:

- благоприятная питательная среда;
- умеренные температуры (20–60 °С);
- нейтральное значение pH среды (6–8).

Анаэробные условия метантенка способствуют развитию целого семейства анаэробных микроорганизмов: сульфатвосстанавливающих, нитратвосстанавливающих и метанобразующих.

Присутствие кислорода в подогревателях, емкостях, сборниках исходного сырья и отферментированной массы дает возможность развиваться также аэробным железо- и серобактериям.

Микробная коррозия, т.е. разрушение металла, связанное с жизнедеятельностью микроорганизмов, происходит по следующим причинам:

- образуются элементы, которые могут вызывать на поверхности металла разность потенциалов;
- в растворе или на поверхности материала образуются агрессивные химические соединения – продукты жизнедеятельности микроорганизмов;
- изменяется редокс-потенциал среды в связи с изменением концентрации кислорода [15].

За последние десятилетия специалистами по коррозии признана важность проблемы биохимического разъедания материалов, о чем свидетельствует все возрастающее число исследований в этой области. По данным авторов [16] анаэробные бактерии способны непосредственно влиять на скорость анодной и катодной реакций, изменять сопротивление поверхностной пленки на металле и повышать коррозионную активность среды. В работе [17] высказано предположение, что непосредственное действие бактерий на металл несущественно, и автор подтверждает это, применяя электрохимическую защиту, полностью предотвращающую биокоррозию железа в почвенных условиях. И. Бут [18] считает, что микроорганизмы вызывают коррозию как за счет аккумуляирования в среде продуктов своей жизнедеятельности – кислот, щелочей, сероводорода – так и путем непосредственного участия в электрохимических реакциях на поверхности материала.

Обычно в коррозионном процессе участвуют бактерии многих видов, ассоциативно связанные между собой. При этом анаэробные условия часто

могут быть созданы деятельностью аэробных бактерий. Поэтому при изучении процессов биокоррозии необходимо учитывать влияние всех продуктов метаболизма микроорганизмов, а не только традиционных коррозионно-активных веществ.

Фон Вольцоген-Кур [19] еще в 1937 г. указывал, что бактерии, образующие метан, оказывают влияние на коррозию. Процесс коррозии в этом случае характеризуется следующими реакциями:

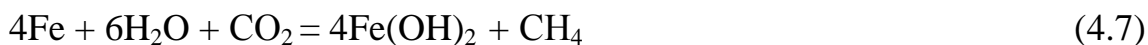


Оба эти уравнения тождественны всем биохимическим реакциям, при которых выделяется водород.

Энергия, необходимая бактериям, получается при восстановлении диоксида углерода:



Суммарная реакция протекает следующим образом:



В качестве продукта коррозии при нейтральном значении pH и температурах 15–55 °C образуется гидроксид железа (II).

Метанобразующие бактерии всегда сосуществуют с сульфатвосстанавливающими бактериями, для которых наиболее благоприятными условиями развития являются pH = 5–9, температура = 22–65 °C.

Химические процессы при биохимическом разрушении железа сульфатвосстанавливающими бактериями протекают следующим образом:



В качестве продуктов коррозии образуются также сульфид железа (II) и гидроксид железа (II).



Известно также, что продуктом метаболизма сульфатвосстанавливающих бактерий, кроме H₂S, является CO₂, поэтому H₂S и CO₂, образующиеся как продукты обмена веществ бактерий, могут растворяться во влажной среде и создавать агрессивную среду в виде сероводородной (H₂S) и угольной кислоты. При совместном присутствии H₂S и CO₂ образующаяся на металле пленка FeS обладает низким защитным действием, поэтому на отдельных участках металла образуются каверны, питтинги и

язвы [20] как результат коррозионных процессов, возникающих при совместном воздействии H_2S и CO_2 на металл.

В состав навоза входят нитраты, которые являются питательной средой для нитратвосстанавливающих бактерий. Коррозия под действием этих бактерий осуществляется по следующим уравнениям:



По данным [15], нитратвосстанавливающие бактерии могут ускорять коррозию стали в морской воде в 1,5–1,7 раза.

Органические соединения навоза окисляются бактериями, причем процесс окисления сопровождается выделением энергии. При этом образуются коррозионно-активные соединения (например, CO_2 и NH_3), которые могут привести к электрохимической коррозии металла.

Для борьбы с микробной коррозией необходимо:

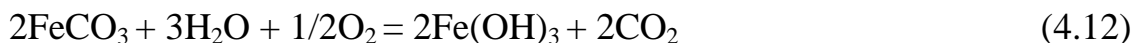
- предотвращать развитие микроорганизмов в рабочих средах;
- предотвращать контакт микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности с поверхностью материала;
- применять в качестве конструкционных материалов такие металлов, ионы которых являются токсичными для микроорганизмов;
- применять катодную защиту.

В работе [21] исследовали химическую стойкость стеклопластиков на основе связующего ПН-15 в среде, имитирующей стоки навоза и помета (состав среды, г/л: нитрат кальция – 7,0; сульфат калия – 0,8; нитрат магния – 2,6; мочевины – 1,2; фосфорная кислота – 2,1; дистиллированная вода – до 1 л; рН среды – 6–7,5). Стойкость образцов стеклопластика оценивалась по изменению массы и линейных размеров, а также физико-механических показателей. По результатам годовых испытаний прочностные (σ_u и σ_p) и весовые показатели изменялись незначительно, то есть материал показал удовлетворительную стойкость к данной среде.

Химический анализ показал, что в отферментированной массе содержится значительное количество железа, кальция, фосфора и углерода. При наличии кислорода (в подогревателе) в данной органической среде развиваются железобактерии – микроорганизмы, которые поглощают железо в виде ионов и выделяют в виде нерастворимых соединений. Они неподвижны, но могут свободно переноситься водой и оседать на стенках. Наиболее благоприятные условия их существования: $pH = 4 - 10$,

$t = 5 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для своего питания в качестве источника углерода эти бактерии используют растворенный в воде CO_2 , в качестве источника азота – аммонийные соли. Энергию бактерии получают за счет окисления соединений железа и органических веществ, содержащих кальций и фосфор. Являясь аэробами, они потребляют кислород, растворенный в воде.

Реакция окисления карбоната железа (II) протекает следующим образом:



Благодаря отложению нерастворимых соединений, на поверхности металла появляются области с различными потенциалами, в анодных зонах которых происходит интенсивное растворение железа, и как следствие – образование питтингов и язв. Язвенный характер биохимической коррозии подтвержден коррозионными испытаниями в подогревателе образцов сталей ВСтЗсп и 09Г2С.

4.1.3. Коррозия бетона и арматуры

В животноводческих помещениях от коррозионного разрушения необходимо защищать не только изделия из металла, но и ограждающие бетонные сооружения. В условиях высокой относительной влажности их поверхность начинает интенсивно сорбировать влагу. Передвижные железобетонные конструкции теряют теплозащитные свойства, промерзают и разрушаются.

В соответствии с классификацией видов коррозии бетона все физико-химические процессы, определяющие коррозионные разрушения бетона, делятся на три основных вида [22]:

- процессы, связанные с действием на бетон воды малой жесткости и водных растворов некоторых солей, способных растворять цементный камень. Ослабление бетона происходит в результате выноса растворимых компонентов цементного камня во внешнюю среду (коррозия выщелачивания);
- химическое взаимодействие между цементным камнем и агрессивными агентами окружающей среды;
- накопление в порах и капиллярах бетона кристаллических новообразований, в результате чего в толще материала возникают внутренние напряжения, которые могут привести к его разрушению. Это накопле-

ние может происходить либо в результате химического взаимодействия агрессивной среды с цементным камнем, при котором в осадок выпадают труднорастворимые вещества, либо при циклическом воздействии растворов минеральных солей, когда насыщение бетона раствором чередуется с высушиванием.

С циклическим воздействием среды связано также морозное разрушение бетона и железобетонных конструкций, когда механизм коррозии определяется процессами многократного поперечного замораживания и оттаивания парообразной среды бетона. Его основной причиной является образование в паровом пространстве бетона льда, объем которого на 9 % больше объема воды. Интенсивность морозного разрушения значительно возрастает, если бетон насыщается не водой, а водными растворами солей. Так, скорость разрушения бетона при циклическом замораживании при температуре -15°C и оттаивании в растворах NaCl повышается в 5–8 раз, в насыщенном растворе карбамида – в 10 раз.

Коррозия стальной арматуры железобетона является следствием электрохимических процессов и обусловлена наличием разности потенциалов на поверхности металла (арматурные стали весьма неоднородны по структуре), наличием достаточного количества деполяризаторов (O_2). Кроме того, высокая влажность ($>50\%$) обуславливает хорошую электролитическую связь между участками поверхности металла.

Коррозионная активность жидких сред определяется присутствием агрессивных компонентов. К таким компонентам относятся ионы K^+ , Na^+ , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} , CO_3^{-2} , HCO_3^- , COOH^- и др. Активные коррозионные процессы возможны в средах, содержащих достаточное количество хлоридов или сульфатов [23].

К газообразным агрессивным средам относятся кислые пары и газы, которые при постоянном контакте с бетоном постепенно насыщают парообразную среду бетона, сообщая ей свойства агрессивного раствора. По механизму коррозионного действия на цементный камень такие растворы практически не отличаются от обычных агрессивных сред. За редким исключением скорость коррозии собственно бетона в газообразных агрессивных средах незначительна, поэтому их действие на строительные конструкции рассматривается в связи с процессами, приводящими к коррозии стальной арматуры.

4.2. Коррозионные исследования и рекомендации по выбору конструкционных материалов оборудования биогазовых установок

4.2.1 Методика проведения коррозионных исследований

Испытания проводились на опытно-промышленной установке «Биогаз-301С» при работе в следующем режиме:

- температура сбраживания, °С 41–42
- содержание сухого вещества в исходном навозе, % 4–8
- значение pH исходного навоза 6,3–7,0
- значение pH среды в метантенке 7,4–8,0
- значение pH отферментированной массы 7,8–8,4
- режим заполнения аппаратов установки:
 - сборники сброженных стоков периодически;
 - подогреватель периодически;
 - метантенк постоянно заполнен

Испытания проводились в подогревателе и метантенке при периодическом перемешивании содержимого. Состав рабочих сред приведен в табл. 4.1.

На основании анализа литературы и с учетом нормативно-технической документации для испытания были выбраны стали ВСт 3сп, 09Г2С, 12Х18Н10Т.

Таблица 4.1 – Место расположения испытуемых образцов и характеристика среды

Место расположения контрольных образцов	Состав рабочей среды
1	2
Подогреватель	исходный жидкий свиной навоз: влажность – 93–94 % размер твердых включений 10–30 мм содержание азота – 9,1–10 кг/т содержание фосфора (P_2O_5) – 14–15 кг/т содержание калия (K_2O) – 2,7–2,8 кг/т значение pH = 6,5–6,8 общая микробная обсемененность – $4,9 \cdot 10^9$ – $8,4 \cdot 10^9$ млн/л коли-индекс – $1,9 \cdot 10^{10}$ – $2,6 \cdot 10^{10}$ БПК ₅ – 37000 мгO ₂ /л; ХПК – 38400 мгO ₂ /л

Продолжение таблицы 4.1

1	2
Метантенк	
Горловина	Газовая фаза (биогаз): метан – 51,6–65,3 % диоксид углерода – 15–21 % азот – 1,8– 4,4 % сероводород – 0–1 % кислород – 0–0,2 % плотность относительная – 0,942
Граница раздела газовой и жидкой фаз	Жидкий навоз и биогаз
Сброженная масса	влажность – 92,2–98,2 % содержание твердых включений – 18,6–69,8 г/л размер твердых включений – 2,1 мм содержание азота общего – 0,13 % содержание фосфора (P_2O_5) – 0,09 % содержание калия (K_2O) – 0,26 % значение pH = 7,6–8,0 общая микробная обсемененность – 1,4 шт/мл коли-индекс – $1,8 \cdot 10^7$ – $2,6 \cdot 10^7$ БПК ₅ – 1680 мгO ₂ /л; ХПК – 2400 мгO ₂ /л
Сборник фугата	Фугат: влажность – 98 99 % размер твердых включений 0,5–0,6 мм содержание, %: азота – 0,17–0,18 содержание фосфора (P_2O_5) – 0,06 – 0,10 содержание калия (K_2O) – 0,11– 0,12 значение pH = 7,5 – 6,2 общая микробная обсемененность – $1,3 \cdot 10^9$ – $1,6 \cdot 10^9$ млн/л коли-индекс – $1,8 \cdot 10^7$ – $2,6 \cdot 10^7$ БПК ₅ – 1680 мгO ₂ /л; ХПК – 2400 мгO ₂ /л

Коррозионным испытаниям подвергались цельные и сварные образцы сталей. Изготовление образцов, подготовку их к испытаниям и обработку после испытаний осуществляли в соответствии с требованиями РТМ 26-01-21-68 (нормативный документ отрасли химического машиностроения «Методы коррозионных испытаний металлических материалов»).

Образцы изготавливались из листовых сталей толщиной 2–4 мм в виде пластин размером 30 x 60 мм. Образцы сварных соединений вырезали из пластин, выполненных в виде односторонних сварных стыковых соединений. Сварные образцы имели один поперечный шов, расположенный в центре образца. Размеры образцов сварных соединений были такими же, как и образцы основного металла. Испытания проводили на образцах с усилением сварочного шва. Все образцы маркировались, собирались в гирлянды, изолировались друг от друга фторопластом. Перед испытаниями образцы взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,0002 г, обезжиривались. Гирлянды подвешивались в аппараты, продолжительность испытаний составляла 1200 часов.

Для оценки величины коррозионных потерь использовали гравиметрический метод. Характер коррозии определяли при помощи лупы с увеличением 8–12, а также микроскопа “Neophot”. Глубину питтингов измеряли с помощью индикатора С-IV и микроскопа “Neophot”.

Скорость коррозии в мм/год рассчитывалась по формуле

$$\dot{I} = \frac{8,76(m_0 + m_1)}{\rho \cdot \tau \cdot F}, \quad (4.13)$$

где – m_0 , m_1 – масса образца до и после испытания, г; F – поверхность образца, см²; τ – время испытания, ч; ρ – плотность металла, г/см³.

Оценка результатов исследований проводилась на основании определения скорости коррозии в соответствии с десятибалльной шкалой коррозионной стойкости по ГОСТ 9.908-85, визуального осмотра, металлографических исследований.

4.2.2 Результаты промышленных коррозионных испытаний

Результаты коррозионных испытаний сталей ВСт3сп и 09Г2С в подогревателе представлены в табл. 4.2.

Все образцы после испытаний были покрыты плотным трудноудаляемым осадком. На образцах углеродистых сталей как цельнометаллических, так и сварных наблюдалась сильная коррозия, имеющая язвы и питтинги; при этом на образцах из стали 09Г2С питтинги более глубокие – 150–250 мкм при диаметре 1 мм и менее. Годовые весовые потери составляли до 2000 г/м² год.

Таблица 4.2 – Результаты промышленных испытаний образцов сталей в подогревателе

Марка стали	Вид образца	Характер коррозии	Глубина коррозии, мкм	Скорость коррозии		Коррозионный бал	Группа стойкости
				г/м ² ч	мм/год		
Сталь ВСт3сп	основной металл	язвенная	60–150	0,154	0,171	6	пониженно стойкие
Сталь ВСт3сп	сварной шов	язвенная	60–90	0,148	0,167	6	пониженно стойкие
Сталь 09Г2С	основной металл	язвенная	150–250	0,1998	0,223	6	пониженно стойкие
Сталь 09Г2С	сварной шов	язвенная	80–220	0,136	0,152	6	пониженно стойкие

На цельных и сварных образцах стали ВСт3сп явно обнаруживалась язвенная коррозия. Глубина язв составила 60–150 мкм при диаметре 1 мм и менее. Годовые потери металла также велики и составили 1500 г/м² год.

Скорость коррозии обеих сталей значительна и составила для стали ВСт3сп – 0,17 мм/год, для стали 09Г2С – 0,22 мм/год.

Результаты коррозионных испытаний образцов сталей ВСт3сп, 09Г2С и 12Х18Н10Т в емкости для сбора фугата представлены в табл. 4.3.

Скорость коррозии углеродистых сталей невелика и составила 0,017 мм/год, коррозионная стойкость соответствует 3–4 баллу.

Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т практически не подвержена коррозии, коррозионная стойкость определяется 1 баллом. Характер коррозии всех испытываемых сталей равномерный.

Таблица 4.3 – Результаты промышленных коррозионных испытаний образцов в емкости для сбора фугата

Марка стали	Вид образца	Характер коррозии	Глубина коррозии, мкм	Скорость коррозии		Коррозионный бал	Группа стойкости
				г/(м ² ч)	мм/год		
Сталь ВСт3сп	основной металл	равномерная	–	0,0145	0,0162	4	стойкий
Сталь ВСт3сп	сварной шов	равномерная	–	0,0058	0,0065	3	весьма стойкий
Сталь 09Г2С	основной металл	равномерная	–	0,0133	0,0150	4	стойкий
Сталь 09Г2С	сварной шов	равномерная	–	0,0121	0,0135	4	стойкий
Сталь 12Х18Н10Т	основной металл	равномерная	–	0,0003	0,0003	1	совершенно стойкий
Сталь 12Х18Н10Т	сварной шов	равномерная	–	0,0007	0,0008	1	совершенно стойкий

В метантенке образцы из сталей ВСт3сп, 09Г2С и 12Х18Н10Т испытание проходили в трех зонах:

- в зоне бродящей массы (жидкой фазе);
- в горловине (газообразной фазе);
- в зоне перехода жидкость – биогаз.

Сталь ВСт3сп в жидкой фазе метантенка проявляет равномерную коррозию, численное значение ее невелико и соответствует 4-му баллу коррозионной стойкости. На образцах из стали 09Г2С наблюдается местная коррозия пятнами, что заметно при визуальном осмотре, особенно при увеличении в 9–12 раз.

На границе раздела фаз на образцах всех испытанных металлов коррозия равномерная, численное значение ее невелико, углеродистые стали в этом случае являются весьма стойкими. В отличие от жидкой фазы метантенка ее газовая фаза является агрессивной, о чем говорит наличие на образцах углеродистых сталей многочисленных язв глубиной до 200 мкм. Это можно объяснить большой влажностью продукционного биогаза и содержанием в нем агрессивных газов – CO_2 , H_2S .

Результаты промышленных коррозионных испытаний в метантенке представлены в табл. 4.4.

Несмотря на небольшие численные значения скорости коррозии сталей ВСт3сп и 09Г2С и довольно высокий коррозионный балл (4), применение этих сталей в зоне накопления газа в метантенке (горловине) без специальной защиты опасно из-за язвенного характера коррозии.

Результаты проведенных промышленных коррозионных испытаний показывают, что рабочие среды аппаратов установки метанового сбраживания отходов животноводства коррозионно активны, причем наиболее агрессивным является жидкий навоз. Агрессивность сред определяется значительным содержанием солей (в том числе хлоридов), диоксида углерода, сероводорода. Перерабатываемая масса с умеренной температурой, нейтральным значением pH, высоким содержанием фосфора, азота, калия, углерода, серы является благоприятной питательной средой для развития микроорганизмов, вызывающих биохимическую коррозию. Основным конструкционным материалом для оборудования установок метанового сбраживания может служить углеродистая сталь. Однако внутренние поверхности оборудования подготовки исходного сырья (сборники, теплооб-

менники, подогреватели), а также газовая полость метантенка должны выполняться из коррозионностойких сталей типа 12X18H10T, двухслойных сталей типа 12X18H10T + ВСтЗсп и т.п. или должны быть защищены от коррозионного воздействия [24].

Таблица 4.4 – Результаты промышленных коррозионных испытаний образцов в метантенке

Марка стали	Вид образца	Характер коррозии	Глубина коррозии, мкм	Скорость коррозии		Корро- зион- ный бал	Группа стойко- сти
				г/(м ² ·ч)	мм/год		
Жидкая фаза							
Сталь ВСт3сп	цельный металл	равномер- ная	без пора- жений	0,023	0,026	4	стойкий
Сталь ВСт3сп	сварной шов	равномер- ная	без пора- жений	0,028	0,032	4	стойкий
Сталь 09Г2С	цельный металл	местная пятнами	без пора- жений	0,026	0,029	4	стойкий
Сталь 09Г2С	сварной шов	местная пятнами	без пора- жений	0,034	0,038	4	стойкий
Граница раздела фаз							
Сталь ВСт3сп	цельный металл	равномер- ная	без пора- жений	0,0015	0,0017	2	весьма стойкий
Сталь ВСт3сп	сварной шов	равномер- ная	без пора- жений	—	—	1	совершенно стойкий
Сталь 09Г2С	цельный металл	равномер- ная	без пора- жений	0,0035	0,0038	2	весьма стойкий
Сталь 09Г2С	сварной шов	равномер- ная	без пора- жений	0,0013	0,0015	2	весьма стойкий
Сталь 12Х18Н10 Т	цельный металл	равномер- ная	без пора- жений	0,00015	0,00015	1	совершенно стойкий
Сталь 12Х18Н10 Т	сварной шов	равномер- ная	без пора- жений	—	—	1	совершенно стойкий
Газовая фаза							
Сталь ВСт3сп	цельный металл	местная язвами	120–200	0,0157	0,0176	4	стойкий
Сталь ВСт3сп	сварной шов	местная язвами	120–200	0,0113	0,0152	4	стойкий
Сталь 09Г2С	цельный металл	местная язвами	100–180	0,0143	0,0160	4	стойкий
Сталь 09Г2С	сварной шов	местная язвами	100–180	0,0171	0,0191	4	стойкий
Сталь 12Х18Н10 Т	цельный металл	равномер- ная	без пора- жений	0,0001	0,0001	1	совершенно стойкий

Сталь 12X18H10 Т	сварной шов	равномер- ная	без пора- жений	0,0005	0,0006	1	совершенно стойкий
------------------------	----------------	------------------	--------------------	--------	--------	---	-----------------------

При монтаже трубопроводов биогазовой установки возможно использование чугунных труб [12], величина коррозии которых показана в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Коррозия чугунных труб, мм/год

Среды	Навоз	
	КРС	Свиной
Навоз	0,005	0,004
Навоз и воздух попеременно	0,04	0,03
Навоз, воздух и вода попеременно	0,05	0,04
Вода	0,03	0,03
Вода и воздух попеременно	0,33	0,33

4.3 Методы повышения коррозионной стойкости углеродистых сталей

Анализ информации, касающейся защиты углеродистых сталей, показывает, что основными способами повышения их коррозионной стойкости являются металлизация, неметаллические, лакокрасочные покрытия.

4.3.1. Металлизация

В рабочих средах установки "Биогаз-301С" проведены исследования коррозионной стойкости образцов из алюминия АД1-М ГОСТ 4784-74 и оцинкованного железа марки ХШ ГОСТ 14918-80. Результаты испытаний образцов в подогревателе и газовой полости метантенка приведены в табл. 4.6. Из полученных данных видно, что алюминий абсолютно стоек в обеих средах, визуально образцы не изменились, сохранили металлический блеск, на поверхности образцов следов коррозии не обнаружено.

Масса образцов, прошедших испытания в подогревателе, незначительно уменьшилась, а образцов, испытанных в газовой полости метантенка, незначительно увеличилась. Последнее объясняется образованием на поверхности алюминия стойкой защитной окисной пленки. Визуальный осмотр образцов из оцинкованного железа показал, что на их поверхности

наблюдается отслаивание цинкового покрытия и местные, локальные вспучивания [25,26].

Таблица 4.6 – Результаты испытаний образцов

Аппарат	Характер коррозии материала		Скорость коррозии, мм/год	
	АД1-М	Оцинкованное железо	АД1-М	Оцинкованное железо
Подогреватель	равномерный	неравномерный, местное отслаивание, вспучивание	0,0007	0,015
Метантенк (газовая полость)	коррозия отсутствует	неравномерный, отслаивание, вспучивание	—	0,0042

Алюминий, обладая высокими антикоррозионными свойствами, может быть использован в качестве защитного покрытия для углеродистой стали. Образующиеся в покрытии поры в условиях высокой влажности быстро заполняются оксидом алюминия, и оно становится практически непроницаемым. Такие покрытия коррозионностойки как в обычных атмосферных условиях, так и в среде, содержащей пары и газы (в том числе сернистые) при высоких температурах, в горячей воде, в аммиачных растворах и кислотах. В щелочных растворах и растворах, содержащих хлористые соединения, оксидная пленка алюминия растворяется, и металл быстро корродирует.

Срок службы алюминиевых покрытий при толщине слоя 130–150 мкм составляет приблизительно 20 лет.

Алюминиевые покрытия можно наносить в заводских условиях непосредственно на лист; при этом перед сваркой не требуется удаление защитного слоя [13]. Для нанесения металлизационных покрытий используют аппараты ЭМ-10,12,14 (электродуговой способ распыления) и МГН-2,5 (газопламенный способ распыления).

Алюминиевые металлизационные покрытия по коррозионной стойкости превосходят однородный алюминий и алюминиевые покрытия, полученные другими способами. По-видимому, это связано с тем, что металли-

зационный алюминиевый слой обеспечивает особенно эффективное уплотнение пор продуктами коррозии и пассивирование всего покрытия.

Цинковое металлизационное покрытие по отношению к стали во всех случаях ведет себя как анод. Его коррозионная стойкость неудовлетворительна в среде, содержащей оксиды серы, хлор и пары HCl [27]. Цинковые покрытия эффективны в средах с pH 6–11; в щелочных растворах с pH >12 и кислотах они неустойчивы. Долговечность цинкового покрытия, как и коррозионная стойкость защищаемого металла, зависит от толщины покрытия.

Результаты сравнительных лабораторных испытаний алюминиевых, цинковых и цинк-алюминиевых покрытий, проведенных французской фирмой "Electricite Fransaise", показали, что в агрессивной среде, содержащей хлориды или смесь сернистого газа и диоксида углерода, наивысшей стойкостью обладали алюминиевые покрытия.

Для защиты сооружений, рассчитанных на длительный срок эксплуатации, или аппаратуры, работающей в сильноагрессивных средах, применяют металлизацию распылением с последующим покрытием лакокрасочными материалами. Это резко увеличивает срок службы покрытия и устраняет один из его недостатков – наличие пор в верхних слоях [28]. Благодаря пропитке микропоры закупориваются и вещества, вызывающие коррозию, не проникают вглубь металлизационного слоя. Кроме того, на шероховатой поверхности металлизационного слоя лакокрасочные материалы держатся гораздо лучше, чем на поверхности стали, обработанной металлическим абразивом. При нарушении лакокрасочного слоя защитную функцию выполняет металлизационный слой.

4.3.2. Неметаллические покрытия

К числу наиболее распространенных неметаллических покрытий относятся:

- полиэтилен ПВО высокого давления, технические условия по ГОСТ 16337-77Е;
- поливинилхлорид ПВХ, технические условия по ГОСТ 14039-78Е;
- фторопласт Ф-4, технические условия по ГОСТ 10007-80Е;
- гуммировочные резины РТМ 3840536-82: 1976-18 на основе каучука СКМС-30 АРКМ-15; 2566 на основе СКБ;

- полуэбониты РТМ 3840536-82: 1751 на основе СКВ; ИРП-1394 на основе СКИ-3 + наирит.

Изготовление образцов, подготовка к испытаниям и обработка их после испытаний производились в соответствии с ГОСТ 9.030-74 (образцы из резины) и ГОСТ 12020-92 (образцы из пластмасс).

Образцы из резины изготавливались в соответствии со стандартами на методы определения физико-механических показателей по ГОСТ 269-66, ГОСТ 270-75, ГОСТ 263-75. Испытания на прочность производились на разрывной машине модели 2001Р-0,5 (ГОСТ 270-75). Измерения твердости по Шору – на приборе ТИР -1 (ГОСТ 263-75).

Образцы из резины имели форму двухсторонней лопатки, а образцы из пластмасс изготавливались в виде пластин либо в виде дисков. Все образцы маркировались. Количество испытанных образцов из одной партии материала – не менее четырех.

Результаты испытаний резины и полуэбонитов и гуммировочных материалов в рабочих средах подогревателя и метантенка (газовая полость) приведены в табл. 4.7, 4.8, 4.9.

Испытания показали, что наиболее высокую стойкость в обоих случаях показала резина на основе натрий-бутадион-стирольного каучука 1976-18. В исходном сырье набухание ее незначительно – от 0,6 до 0,9 %; увеличение твердости составило 4,5 %, снижение прочностных свойств – 2,6 %. В газовой полости метантенка твердость этой резины осталась неизменной.

Таблица 4.7 – Изменение массы образцов резины и полуэбонитов по результатам испытаний

Гуммировочные материалы		Подогреватель		Метантенк (газовая полость)	
Марка	Тип каучука	среднее изменение массы образцов, %	группа (оценка) стойкости	среднее изменение массы образцов, %	группа (оценка) стойкости
1976-18	СКМС-30-АРКМ-15	+0,62	1н	+4,43	1н
2566	СКВ	+0,86	1н	+3,94	1н
1751	СКВ	–0,50	1н	+2,02	1н

4РП-1394	СКИ-3+ наирит	–0,09	1н	+0,72	1н
----------	------------------	-------	----	-------	----

Несколько хуже результаты, относящиеся к резине на основе бутилкаучука марки 2566. Прочность ее при воздействии исходного сырья снизилась на 13,3 %, а при воздействии биогаза – на 21,1 %. Однако эти показатели находятся в пределах допустимой нормы.

Из данных табл. 4.8 видно, что резина и полуэбонит в исходном сырье склонны к повышению твердости, а прочность их снижается как при незначительном набухании, так и при незначительном растворении полуэбонитов. В газовой полости метантенка резина также склонна к набуханию с потерей прочностных свойств и твердости. Однако эти изменения находятся в пределах нормы.

Таблица 4.8 – Изменение механических свойств гуммировочных материалов в результате воздействия исходного сырья в подогревателе

Материал		Твердость, усл.ед.			Прочность, (МПа) (кгс/см ²)			Относительное удлинение, %		
Марка	Тип каучука	начальная	конечная	% изм.	начальная	конечная	% изм.	начальное	конечное	% изм.
1976-18	СКМС-30-АРКМ-15	66	69	+4,5	80 (7,7)	80 (7,5)	–2,6	200	180	–10,0
2566	СКВ	52	54	+3,8	45 (4,5)	40 (3,9)	–13,3	615	545	–11,4
1751	СКВ	94	101	+7,4	80 (7,7)	70 (7,0)	–9,1	0	0	0

Таблица 4.9 – Изменение механических свойств гуммировочных материалов в результате воздействия газовой фазы (биогаза) метантенка

Материал		Твердость, усл.ед.			Прочность, (МПа)(кгс/см ²)			Относительное удлинение, %		
Марка	Тип каучука	начальная	конечная	% изм.	начальная	конечная	% изм.	начальная	конечная	% изм.
1976-18	СКМС-30-АРКМ-15	66	66	0	80 (7,7)	70 (7,3)	–5,2	200	242	+ 21,0

2566	СКВ	52	48	–11,5	45 (4,5)	40 (3,6)	–21,1	615	500	– 18,7
1751	СКВ	94	83	–74	80 (7,7)	70 (6,8)	–11,7	0	0	0

Результаты испытаний пластмасс приведены в табл. 4.10. Внешний вид образцов из пластмасс после испытаний остался без видимых изменений. Изменения линейных размеров по толщине образцов также невелики и составили 0,2 %. Из данных таблицы видно, что в среде исходного сырья (подогреватель) и биогаза (газовая полость метантенка) полиэтилен и поливинилхлорид набухают, а фторопласт незначительно растворяется.

Таблица 4.10 – Изменения массы образцов из пластмасс от воздействия сред подогревателя и газовой полости метантенка

Материалы	Среднее изменение массы образца, %	
	Подогреватель	Метантенк (газовая полость)
Полиэтилен высокого давления	+0,04	+0,15
Поливинилхлорид (винипласт)	+0,09	+0,17
Фторопласт	–0,003	–0,015

Пластмассовые покрытия на основе термопластов – полиэтилен, фторопласт и поливинилхлорид – показывают хорошую стойкость в средах аппаратов метанового сбраживания, и их можно успешно использовать для защиты углеродистой стали от коррозии.

Пластмассовые покрытия на основе реактопластов применяются в основном в жидком и пастообразном виде (растворы, суспензии, замазки, мастики). Для крупногабаритного оборудования, такого как металлические и железобетонные емкости-метантенки, наиболее эффективны монолитные бесшовные покрытия на основе термореактивных смол. Их стоимость значительно ниже стоимости футеровок.

Из реактопластов наибольшее применение получили эпоксидные, фенолформальдегидные, полиэфирные смолы.

Эпоксидные смолы обладают хорошими физико-химическими свойствами, химической стойкостью и прекрасной адгезией к различным материалам [28].

Фенолформальдегидные смолы обладают высокой теплостойкостью, стойкостью к действию большинства кислот. Фурановые полимеры имеют ограниченную водостойкость.

Учитывая крупные габариты емкостей и необходимость холодного затвердевания покрытий, для защиты от коррозии применяют в основном эпоксидные и полиэфирные смолы, а также их модификации [28].

Замазки и мастики на основе фенолформальдегидных и фурановых смол известны под названиями орзамит, фуранкор и др.

Недостатком покрытий на основе фенолформальдегидных и фурановых смол является то, что после их непосредственного нанесения на металл или бетон и последующего отверждения происходит образование кислот. В этой связи на защищаемые поверхности необходимо предварительно наносить грунтовку из материалов, не вызывающих коррозию этих поверхностей.

В настоящее время широкое распространение получила техника нанесения покрытий эпоксидными композициями без использования растворителей. По сравнению с композициями, содержащими растворители, они имеют следующие преимущества:

- отсутствие пор и капилляров, образующихся при испарении растворителя, и в связи с этим – высокая плотность защитной пленки;
- уменьшение усадки и внутренних напряжений в покрытии;
- повышение химической стойкости и долговечности.

4.3.3. Лакокрасочные покрытия

Лакокрасочные материалы, используемые в качестве защитных покрытий, выбирают в зависимости от агрессивности среды в соответствии

с ГОСТ 25112-82 «Покрытия лакокрасочные машин и оборудования для животноводства и кормопроизводства. Общие технические требования» (табл. 4.11). Системы водоснабжения, стойловые ограждения, нестандартное оборудование защищается от коррозии в соответствии с отрасле-

вым стандартом ОСТ 70.0004.0014-82, который предусматривает также покрытия для жестких условий эксплуатации (при относительной влажности воздуха, содержащего агрессивные газы, более 75 % либо при контакте с жидкой агрессивной средой).

Таблица 4.11 – Лакокрасочные покрытия для противокоррозионной защиты оборудования животноводческих помещений

Грунтовка	Эмаль, лак	Число слоев эмали	Общая толщина покрытий, мкм
ХС-068	ХВ-110	2	50–60
ХС-068	ЭП-140	2	50–60
ХС-068	ЭП-773	2	50–60
	ОС-74	2–3	150–200
ХС-010	ХС-710	2	50–60
ФЛ-03К	АС-182	3	65–70

На установке "Биогаз-301С" проведены промышленные испытания монолитных покрытий на основе реакционноспособных олигомеров холодного отвердевания, в частности, эпоксидно-фенольные ЭФФК "Викор VII" на конструкциях с различной подготовкой поверхности металла, а также на бетонных образцах. Результаты исследований приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты испытаний покрытия "Викор"

№ экспозиции	Разрушающее напряжение при растяжении, кг/см ²					Относительное удлинение при разрыве, %					Адгезионная прочность, кг/см ²				
	исх.	3 мес.	6 мес.	9 мес.	12 мес.	исх.	3 мес.	6 мес.	9 мес.	12 мес.	исх.	3 мес.	6 мес.	9 мес.	12 мес.
1	413	485	458	460	452	1,72	2,0	1,64	1,72	1,68	160	127	147	160	160
2	402	436	420	400	412	1,25	1,25	1,18	1,0	1,10	160	138	118	120	111
3	402	485	458	472	468	1,25	2,0	1,64	1,34	2,40	160	136	130	142	136

Анализ проведенных испытаний показывает, что:

- покрытие обладает высокой химической стойкостью, диффузионная непроницаемость таких покрытий может быть обеспечена в течение 5–6 лет;

- изменения физико-механических характеристик таких покрытий в средах установки «Биогаз-301С» практически не происходит;
- адгезионная прочность покрытия довольно высока и сохраняется на уровне 111–160 кг/см²;
- специальная подготовка поверхности металла обеспечивает полное отсутствие подпленочной коррозии.

На основании проведенных работ разработана технология нанесения противокоррозионных композиционных полимерных покрытий в производственных условиях, которая предусматривает:

- подготовку поверхности металла дробеструйным или пескоструйным методом согласно ГОСТ 9.402.80;
- нанесение специального защитного грунтового слоя;
- нанесение кистью, валиком или механическим путем антикоррозионного покрытия: для малогабаритных изделий – в производственных условиях, а для крупногабаритных – на монтажной площадке;
- контроль качества покрытий.

При соблюдении требований к подготовке поверхности, режимов нанесения и сушки покрытия обеспечивается надежная противокоррозионная защита в течение 3–6 лет.

Безвредными для животных являются эмали МЛ-12-02, ХВ-785, ЭП-140, ЭП-773, ХВ-1100 (ГОСТ 9754-76, ГОСТ 7313-75, ГОСТ 24709-81, ТУ 6-10-1301-83). В хозяйственном и пищевом водоснабжении разрешены грунтовки ВЛ-02, ВЛ-023 (ГОСТ 12707-77) эмали ХС-710, ХС-558; ХС-769 (ТУ 6-21-7-89).

В последнее время нашли широкое применение эпоксидные лаки и эмали, которые могут затвердевать без нагрева. Так, перхлорвиниловые и полихлорвиниловые лакокрасочные материалы высыхают при комнатной температуре за 2–3 ч.; температурный предел их применения 60 °С. Покрытия марки ХС, ПХ13 обладают высокой стойкостью к действию агрессивных газов, но мало устойчивы к действию воды. Лакокрасочные покрытия на основе эпоксидных смол обладают хорошей адгезией к металлу, дереву и бетону, высокой эластичностью и химической стойкостью.

Эмаль ЭП-574 (ГОСТ 9825-73) применяют для окраски бетонных и металлических поверхностей. Эмаль ХВ-785 (ГОСТ 7313-75) используется

для защиты металлических конструкций в условиях постоянного воздействия агрессивных газов (SO_2 , CO_2 , Cl) и кислот (H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4).

Для защиты бетонных и железобетонных сооружений от влаги используются лаки УР-177, УР-973, УР-976, УР-9130 (ГОСТ 9825).

4.4. Методы повышения стойкости бетонных сооружений на предприятиях животноводства

В сельскохозяйственном производстве, в том числе в системах метанового сбраживания отходов животноводства, широкое распространение находят сооружения из бетона. Это отстойники, наполнители, сборники навоза, в некоторых случаях – метантенки.

Коррозионная стойкость железобетонной конструкции во многом определяется минеральным составом применяемого цемента. Достаточную стойкость бетона можно обеспечить следующими путями:

- выбором соответствующих исходных материалов;
- использованием химических добавок;
- пропиткой готовых железобетонных изделий.

Для работы в агрессивных средах выбирают химически стойкие бетоны, наибольшее распространение из которых получили кислотоупорные бетоны, полимерсиликатобетоны и полимербетоны. Кислотоупорный бетон получают путем добавки жидкого стекла Р 50-418-92 в кислотоупорные наполнители. Ускорителем затвердевания является кремнефтористый натрий (ГОСТ 87-77). В качестве наполнителей используют порошки кислотоупорных природных материалов (андезит, диабаз, кварц) или порошки, полученные помолотом искусственных кислотоупорных материалов (каменное литье, кислотоупорная керамика) [22].

Полимерсиликатобетоны состоят из тех же компонентов, что и кислотоупорные бетоны с тем отличием, что в них дополнительно вводят фуриловый спирт (ОСТ 59-127-73) в количестве 3 % от массы жидкого стекла. Эта добавка обеспечивает более высокую плотность, прочность и водостойкость бетона.

Высокой прочностью (до 90 МПа) и химической стойкостью обладают полимербетоны. Полимербетон получают при затвердевании смеси, состоящей из связующего (эпоксидные, полиэфирные, акриловые, фурановые и др. смолы), отвердителей и наполнителей. Наибольшее распростра-

нение для химически стойких конструкций нашли фурановые смолы типа ФАМ, ФА ГОСТ 9825-73 и их модификации [28].

Мощным средством улучшения эксплуатационных свойств бетона являются химические добавки, использование которых на 3–4 марки повышает непроницаемость (плотность) бетона. С помощью химических добавок можно улучшить структурные характеристики цементного камня, повысить морозостойкость, прочность бетона, защитить от коррозии стальную арматуру. Добавка суперпластификатора С-3 в количестве 0,2–1,2 % от массы цемента повышает водонепроницаемость бетона на 2–3 марки, прочность на 30–40 %. Она также увеличивает стойкость бетона в растворах минеральных солей в условиях капиллярного подсоса и попеременного увлажнения и высушивания. Несколько более эффективным, чем использование добавки С-3, является применение алифатической эпоксидной смолы ДЭГ-1 и уплотняющей добавки ТЭГ-1. Кремнийорганическая жидкость ГКЖ-94, вводимая в бетонную смесь в количестве от 0,03 до 0,08 % от массы цемента повышает морозостойкость бетона в 3–4 раза, водонепроницаемость на 2 марки, значительно повышает стойкость к воздействию растворов минеральных солей в условиях капиллярного подсоса и попеременного увлажнения и высушивания. Пластифицирующая добавка ОНРО (отходы от производства антибиотика олеандомицина) вводится в количестве от 0,1 до 0,15 % от массы цемента. Коррозионную стойкость цементного камня и керамзитобетона увеличивают добавки золы теплоэлектростанций (15–20 % от массы цемента) [23].

Солестойкость бетона повышается с применением пуццоланового и шлакопортландцементов. Значительно повышает солестойкость глиноземистый цемент, несколько меньше – сульфатостойкий портландцемент.

Весьма эффективным средством повышения коррозионной стойкости железобетонных изделий является пропитка их различными химически стойкими веществами (битумом, метилметакрилатом, стиролом, петролакумом), серой. Этим достигается резкое повышение непроницаемости изделий. По эффективности противокоррозионной защиты пропитка может конкурировать с изолирующими материалами.

Широко используется в практике пропитка железобетонных изделий гидрофобизаторами типа ГКЖ-94. Ее производят после монтажа конструкции путем простого смачивания поверхности. Гидрофобизация существен-

но снижает водопоглощение бетона, препятствует проникновению в его толщу агрессивных водных растворов, в 2–3 раза повышает морозостойкость. Чаще всего применяют 5 %-ный раствор гидрофобизатора ГКЖ-94 в толуоле. На конструкциях, находящихся на открытом воздухе, пропитку необходимо возобновлять через 5–6 лет.

Эффективен метод гидрофобной защиты внутренних поверхностей ограждающих конструкций животноводческих ферм кремнийорганическими жидкостями ГКЖ-10 и ГКЖ-11. Ориентировочный расход 3–5 % гидрофобизирующего раствора при двухслойном нанесении составляет: по штукатурке – 270–280 г/м², по керамзитобетону – 37–400 г/м², по кирпичу – 450–600 г/м².

Надежным и дешевым способом защиты бетонных сооружений является нанесение на поверхность фактурного слоя полимерцементного раствора. Срок службы такого покрытия достигает 50 лет.

В очень агрессивных средах железобетон должен применяться со специальной противокоррозионной защитой. При высокой агрессивности грунтовых вод применяется многослойная антикоррозионная защита, состоящая из грунтовочного слоя гидроизоляции и защитного покрытия, в качестве которого могут быть использованы различные мастики, полимер-растворы, мятая глина высокой плотности, штучные материалы, укладываемые на растворах.

4.5. Методы защиты от разрушения метантенков индивидуальных хозяйств

Индивидуальные фермерские биогазовые установки зачастую изготавливаются из подручных строительных материалов. При этом, как правило, метантенки заглубляют в землю. В этом случае строительная конструкция должна быть защищена как от внешних источников разрушения – подземных грунтовых вод, так и от воздействия агрессивной среды, находящейся в метантенке.

В качестве строительных материалов используют:

- бетон, заливаемый на месте;
- бетонные блоки;
- кирпич, отоженный из глины;
- блочные бетонные плиты;

- строительный раствор для кирпичной кладки.

Изготовление бетонных блоков, заливка кладки из кирпича должны осуществляться с использованием исходных материалов соответствующего качества, а именно:

- цемент – рекомендуется использовать портландцемент, полученный доменным способом марки не ниже 300;
- песок – среднего размера без органических инородных примесей с содержанием мелкой фракции не более 3 % и слюды не более 0,5 %;
- камень – дробленый камень или галька размером 0,5–2,0 см с пористостью не более 45 %. Прочность камня должна быть в 1,3–1,5 раза, выше чем прочность бетона;
- вода – питьевая.

При заливке бетона на месте строительства среднее значение прочности бетона для каждой части метантенка должно быть не меньше расчетного для стандартной марки 150. Бетон должен уплотняться вибрацией, не допускаются пористость, чешуйчатость, трещины. Заливка должна осуществляться при температуре не ниже 5 °С, выдерживание – 12–14 дней.

Раствор для изготовления бетонных блоков должен готовиться в заводских условиях и иметь прочность не ниже, чем для марки 100.

Для кирпичной кладки используется кирпич марки 75 правильной формы без трещин и пустот. Раствор для кирпичной кладки готовится на цементной основе с прочностью не ниже прочности марок 50–75.

Наиболее ответственным и важным моментом монтажа является обработка внутренней поверхности метантенка и его элементов с целью герметизации и водонепроницаемости. Китайский стандарт СтВ4752-84 [29] рекомендует выполнять нанесение уплотнительных слоев по технологии, приведенной в табл. 4.13.

Таблица 4.13 – Способы герметизации метантенков

Структурные слои	Материал	Толщина слоя, мм	Примечание
1	2	3	4
Семислойная структура			

1. Фиблирование основного слоя	чистый цементный раствор с отношением воды к цементу 0,4, 1–2 слоя	—	Применяется для внутренней герметизации метантенков, изготовленных из блочных материалов (бетонные блоки и кирпич)
2. Штукатурка основного слоя	цементный раствор 1:3	5	
3. Фиблирование	чистый цементный раствор – 1 слой	—	

Продолжение таблицы 4.13

1	2	3	4
4. Штукатурка среднего слоя	цементный раствор 1:25	5	
5. Фиблирование	чистый цементный раствор – 1 слой	–	
6. Штукатурка лицевой поверхности	цементный раствор 1:25	5	
7. Обработка лицевой поверхности	–	–	
Пятислойная структура			
1. Фиблирование основного слоя	чистый цементный раствор с отношением воды к цементу 0,4, 1–2 слоя	–	Применяется для герметизации метантенков, изготовленных из бетона и блочных материалов
2. Штукатурка основного слоя	цементный раствор 1: 3	5	
3. Фиблирование	чистый цементный раствор – 1 слой	–	
4. Штукатурка лицевой поверхности	цементный раствор 1:25	5	
5. Обработка лицевой поверхности		–	
Четырехслойная структура			
1. Фиблирование основного слоя	чистый цементный раствор с отношением воды к цементу 0,4, 1–2 слоя	–	Применяется для герметизации загрузочных и выгрузочных камер
2. Штукатурка основного слоя	цементный раствор 1: 3	5	
3. Штукатурка лицевой поверхности	цементный раствор 1:2,5	5	
4. Обработка лицевой поверхности	–	–	
Трехслойная структура			
1. Фиблирование основного слоя	цементный раствор 1:3	5	Применяется для герметизации внутренней поверхности
2. Штукатурка лицевой поверхности	цементный раствор 1:2,5	5	

3. Фиблирование лицевой поверхности	чистый цементный раствор в 3 слоя	—	выгрузочных камер
Однослойная структура			
1. Фиблирование	чистый цементный рас- твор в 1–3 слоя	—	Применяется для герметизации внут- ренней поверхности впускных и вы- грузочных труб

Обработка лицевой поверхности для семислойной и пятислойной структуры может выполняться следующими способами:

- уплотнение с использованием слоя из силиката натрия: чистый цементный раствор и силикат натрия поочередно наносятся 5–7 раз. Заглаживание слоев, отслаивание и раковины не допускаются;
- уплотнение с использованием парафина. Внутренняя поверхность, обработанная цементным раствором, просушивается с помощью лампы, затем послойно горячим распылением наносится парафин, который заполняет поры обрабатываемого слоя.

Глава 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАНОВОГО СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Животноводческие комплексы, на которых утилизация отходов осуществляется путем метанового сбраживания, могут служить примером организации безотходного производства сельскохозяйственной продукции, поскольку в этих хозяйствах производится не только обезвреживание отходов, но и превращение их в полезные продукты: биогаз, высококачественные органические удобрения и кормовые добавки. Эффективность использования биогазовых установок различна для разных стран и зависит от цен на энергоносители и удобрения, а также от экологического законодательства и степени поддержки возобновляемых источников энергии в стране. Значительное влияние на эффективность БЭУ оказывают такие факторы, как природно-климатические условия, вид, состав и состояние исходных материалов для сбраживания, технологические и технические параметры установки, режим её работы. По мнению немецких специалистов, экономичность биогазовых установок можно гарантировать, если удельные первоначальные капитальные вложения на одну условную голову не превышают 500–1000 евро, а удельный выход полезно используемого биогаза составляет не менее 0,4 м³ с одного килограмма сухого органического вещества [1].

Среди технологических параметров, влияющих на эффективность работы установки (температура сбраживания, время выдержки сырья в биореакторе, концентрация сухих веществ, доза загрузки сырья в метантенк), наиболее дискуссионным является температура, так как биогаз может вырабатываться в интервале 15–65 °С. В большинстве европейских стран доминируют мезофильные режимы сбраживания (30–37 °С). В Японии, Германии и Швейцарии наметилась тенденция к применению психрофильных процессов (20–25 °С), как наиболее экономичных. Использование термо-

фильных режимов редко встречается в практике европейских стран. Это объясняется тем, что термофильные условия требуют большего расхода топлива на поддержание стабильного температурного режима – до 30–40 % от объёма производственного биогаза. Однако, как показал опыт России [2], проигрывая в энергетическом обеспечении процесса, можно получить выигрыш по целому ряду важнейших показателей, в том числе:

- получить биогаз, не содержащий сероводород – мощнейший агент электрохимической коррозии металлического оборудования. Это позволяет использовать для утилизации биогаза оборудование из обычной углеродистой стали;

- получить экологически чистые, высокоэффективные органические удобрения, содержащие активные биостимуляторы роста растений, которые вырабатываются только в термофильных условиях [2]. Благодаря производству таких удобрений биогазовые установки становятся рентабельными и могут иметь срок окупаемости несколько месяцев (табл. 5.1).

Температурный режим влияет также на ряд других технологических показателей процесса, характеризующих его экономичность. От температуры, в частности, зависит выход биогаза и время выдержки сырья в биореакторе. В свою очередь, от продолжительности сбраживания зависит объём метантенка, а следовательно, металлоёмкость конструкции и капитальные затраты.

Таблица 5.1 – Экономическая эффективность биогазовых установок ИБГУ-1, БИОЭН-1(в ценах 2002 г.)

1	Показатели	ИБГУ-1	БИОЭН-1
2	Стоимость установки, тыс. руб.	150,0	360,0
3	Производительность по удобрениям, т/год	72,0	360,0
4	Общая стоимость удобрений, тыс. руб.	360,0	1800000,0
5	Окупаемость установки, месяцев	6,0	5,0
6	Максимальное количество обрабатываемых углей, га	72,0	360,0

7	Общий дополнительный урожай картофеля, (30 %),т	324,0	1620,0
8	Стоимость дополнительного урожая, тыс. руб. (4000 руб./т)	1296,0	6480,0
9	Окупаемость установки за счёт реализации всего урожая, год	1/8	1/18

На величину эксплуатационных затрат влияет коэффициент использования оборудования, который определяется такими параметрами, как доза и периодичность загрузки сырья в метантенк [3].

Выход биогаза увеличивается с увеличением интенсивности и периодичности перемешивания сырья в метантенке. В то же время интенсификация перемешивания требует повышения затрат энергии, то есть ведёт к увеличению эксплуатационных расходов.

Давление в газовой полости метантенка также влияет на выход биогаза и построение всей схемы установки. Считается, что при разрежении выход биогаза выше, чем при избыточном давлении [4]. Тем не менее большинство метантенков работает при избыточном давлении, что, по мнению специалистов, служит гарантией их безопасной эксплуатации [3].

Таким образом, экономичность метанового сбраживания зависит от разноречивого влияния многих параметров. Отсюда очевидна необходимость оптимизации технологического режима в каждом конкретном случае применения технологии. В качестве параметра оптимизации обычно принимают производительность установки по биогазу. Однако общий выход биогаза не может служить показателем эффективности работы установки. Оценку необходимо производить по товарному биогазу – разности между общим количеством производимого биогаза и его количеством, расходуемым на собственные нужды установки (поддержание теплового режима) и нужды хозяйства. В то же время неправильно оценивать эффективность рассматриваемой технологии только по количеству производимой энергии. Не менее важен аспект охраны окружающей среды и получения экологически чистых органических удобрений [5,6]. Неоспорима и эффективность использования биогумуса в сельскохозяйственном производстве: срок окупаемости капитальных затрат на строительство биогазовых установок в хозяйствах, производящих биогумус, значительно ниже, чем в хозяйствах, использующих в качестве удобрений только обезвоженный шлам. Так,

расчетная окупаемость установки производительностью 336 м³/сут по исходному сырью и производительностью 2000 т/год биогумуса составляет 1,9–2 года, в то время как без производства гумуса (с использованием обезвоженного шлама в качестве твердых удобрений) окупаемость составляет 4–4,2 года [7].

Очевидно, что эффективность биогазовых установок должна определяться комплексно с учетом экологических, агрохимических и других показателей. Относительно удельного веса этих показателей в оценке общей эффективности производства биогаза существуют различные мнения специалистов. Часть исследователей считает, что эффективность технологии должна определяться по количеству получаемой энергии в виде биогаза с учетом сэкономленной энергии за счет полной или частичной замены минеральных удобрений, сокращения транспортных расходов на их доставку. Признавая ценность получаемых органических удобрений, их влияние на повышение урожайности, положительную роль в структуризации почв и образовании гумуса они, тем не менее, при оценке экономического эффекта рекомендуют принимать в расчет только его энергетическую составляющую [8,9]. Большинство же специалистов сходится во мнении, что объективная оценка эффективности БЭУ должна учитывать все аспекты технологии: технические, агрохимические, экологические и социальные [10–13].

Комплексная оценка экономической эффективности биогазовой установки должна производиться путем сравнения полученных результатов с затратами. Критерием оценки является годовой экономический эффект \mathcal{E} . При его расчете учитывают годовой прирост доходов P от реализации продуктов сбраживания, величину предотвращенного ущерба от загрязнения окружающей среды ΣY и величину затрат на внедрение установки Z :

$$\mathcal{E} = P + \Sigma Y - Z. \quad (5.1)$$

Годовой прирост доходов (P , грн) рассматривается как сумма доходов, полученных от использования продуктов переработки, и выражается уравнением:

$$P = P_1^i + P_2^i + P_3^i, \quad (5.2)$$

где P_1^i – прирост доходов от использования биогаза;

P_2^i – прирост доходов от использования отферментированной массы, обезвоженного шлама, жидкой фракции сброженных отходов;

P_3^i – дополнительная прибыль, полученная за счет экономии материалов на строительство отстойников, использования жидкой фракции сброженной стоков вместо технической воды и т.д.

Величина приведенных затрат [12] на внедрение установки определяется:

$$З = С + (Е_n + К_{тр} + К_p) З_k, \quad (5.3)$$

где $С$ – эксплуатационные затраты на обслуживание установки;

$$С = 365 \cdot W_э \cdot Ц_э + З_n \cdot n, \quad (5.4)$$

где $W_э$ – суточный расход (потребление) электроэнергии;

$Ц_э$ – цена за электрическую энергию;

$З_n$ – заработная плата оператора с начислениями;

n – количество операторов, обслуживающих установку

$Е_n$ – нормативный коэффициент капитальных вложений;

$К_{тр}$, $К_p$ – нормы отчислений на текущий, капитальный ремонт и реновацию.

$З_k$ – капитальные вложения – определяются по формуле

$$З_k = C_o + C_c + C_m, \quad (5.5)$$

где C_o – стоимость основного технологического оборудования;

C_c – стоимость строительных работ с учетом стоимости стройматериалов;

C_m – стоимость монтажных работ.

5.1. Энергетическая составляющая экономического эффекта

Величина энергетической составляющей экономического эффекта (P_1^i) зависит от количества и качества произведенного биогаза, а также от количества тепловой или электрической энергии, которую можно из него получить.

Производство тепловой энергии осуществляют за счет сжигания биогаза в регенерирующих установках. Эффективность регенерации зависит от эффективности используемого устройства, его коэффициента полезного действия.

При использовании биогаза для производства только тепловой энергии значение прибыли (P_1^1) определяется по формуле:

$$P_1^1 = \eta_1 \cdot Q_1 \frac{V_{\dot{a}}}{q_{\dot{a}}^1} \cdot \ddot{O}_1, \quad (5.6)$$

где Q_1 – тепловая мощность нагревательного устройства;

$V_{\dot{a}}$ – производительность установки по товарному биогазу;

$q_{\dot{a}}^1$ – потребление биогаза нагревательным устройством;

Π_1 – цена на тепловую энергию;

η_1 – КПД нагревательного устройства.

Часто для сжигания биогаза используют устройства, предназначенные для сжигания природного газа. В технических характеристиках таких устройств указывают значение q_n для природного газа. В этом случае значение $q_{\dot{a}}^1$ определяется по формуле

$$q_{\dot{a}}^1 = \frac{\tilde{N}_{\dot{a}}}{\tilde{N}_i} \cdot q_i, \quad (5.7)$$

где $C_{\dot{a}}$ – теплота сгорания биогаза (зависит от содержания метана);

C_n – теплота сгорания природного газа.

Электрическую энергию из биогаза можно производить в электрогенераторах, в качестве привода которых применяют газовые двигатели внутреннего сгорания. Однако в этом случае энергетический потенциал сжигаемого в двигателе биогаза только частично реализуется в виде механической и электрической энергии; остальная часть (около 70 %) теряется с охлаждающей водой двигателя и горячими выхлопными газами. Более целесообразно использовать тепло охлаждающей воды двигателя в циркуляционной системе биореактор – двигатель, а тепло выхлопных газов утилизировать в теплообменнике с дальнейшим использованием для горячего водоснабжения фермы. В этом случае коэффициент энергоиспользования системы может быть доведен до 90 %.

При использовании биогаза для производства только электрической энергии значение P_1^2 определяется по формуле:

$$P_1^2 = \eta_2 \cdot N_1 \frac{V_{\dot{a}}}{q_{\dot{a}}^2} \cdot \ddot{O}_2, \quad (5.8)$$

где N_1 – электрическая мощность газового электрогенератора;

$q_{\dot{a}}^2$ – расход биогаза газового двигателя; определяется по формуле (5.7).

Π_2 – цена на электроэнергию;

η_2 – КПД газового электрогенератора.

При использовании биогаза для производства электрической и тепловой энергии с утилизацией тепла выхлопных газов прибыль рассчитывается по формуле

$$P_1^3 = \left(Q_3 \frac{V_{\dot{a}}}{q_{\dot{a}}^3} \cdot \ddot{O}_1 + N_3 \frac{V_{\dot{a}}}{q_{\dot{a}}^3} \cdot \ddot{O}_2 \right) \cdot \eta_3, \quad (5.9)$$

где Q_3 и N_3 – соответственно тепловая и электрическая мощность устройства;

$q_{\dot{a}}^3$ – расход биогаза;

η_3 – КПД устройства.

Возможно использование биогаза в качестве топлива для автомобильных двигателей. Для этого его необходимо компримировать. Однако эффективность такого способа утилизации биогаза вызывает сомнения, так как компримирование до давления 20,0–21,0 МПа требует значительных энергетических затрат. К тому же около 25 % объема сжатого биогаза составляют примеси (в основном негорючий CO_2), снижающие энергетический потенциал топлива. При использовании в установках компримирования биогаза, очищенного от CO_2 , эффективность метода определяют сопоставлением затрат на очистное оборудование и полученную прибыль от использования биогаза.

5.2. Агрохимическая составляющая экономического эффекта

Величина агрохимической составляющей экономического эффекта (P_2^i) определяется прибылью, получаемой от использования отферментированной массы, обезвоженного шлама и жидких стоков в качестве удобрений, а также доходами за счет снижения затрат на вывоз и хранение непереработанных отходов.

Прибыль от использования удобрений определяется на основе сопоставления дополнительных производственных затрат на применение удобрений и стоимости прибавки урожая от их использования.

Прибыль от использования отферментированной массы без ее разделения на фракции:

$$P_2^1 = \frac{V_{\dot{\phi}}}{I_{\dot{\phi}}} \cdot \Delta \acute{O}_s \cdot \ddot{O}_s - C_{\text{заф}}^{\dot{\phi}}, \quad (5.10)$$

где $V_{\dot{\phi}}$ – производительность установки по отферментированной массе, т/год;

$I_{\dot{\phi}}$ – норма внесения удобрения, т/га;

ΔY_i – прибавка урожая i -й культуры, т/га;

Π_i – цена единицы полученной продукции, грн/т;

$Z_{\text{аф}}^{\phi}$ – затраты на внесение отферментированной массы, грн/год.

Прибыль от использования обезвоженного шлама в качестве удобрений:

$$D_2^{\phi} = \frac{V_{\phi}}{I_{\phi}} \cdot \Delta O_3 \cdot \ddot{O}_3 - C_{\text{аф}}^{\phi}, \quad (5.11)$$

где $V_{\text{ш}}$ – производительность установки по обезвоженному шламу;

$H_{\text{ш}}$ – норма внесения шлама; $Z_{\text{аф}}^{\phi}$ – затраты на внесение шлама.

Прибыль от использования жидких стоков для удобрения и подкормки растений:

$$P_2^3 = \frac{V_c}{H_{\text{н}}} \cdot \Delta O_3 \cdot \ddot{O}_3 - C_{\text{аф}}^{\text{н}}, \quad (5.12)$$

где V_c – производительность установки по жидким стокам;

H_c – норма внесения жидких стоков;

$Z_{\text{аф}}^{\text{н}}$ – затраты на внесение.

В том случае, когда отферментированная масса, обезвоженный шлам и жидкие стоки не используются в хозяйстве, а реализуются как товарный продукт, прибыль от их продажи определяется договорной ценой и количеством производимого продукта.

Прибыль от использования жидких органо-минеральных удобрений, произведенных на основе отферментированной массы или жидких стоков:

$$P_2^4 = \frac{V_{\text{е}}}{H_{\text{е}}} \cdot \Delta O_3 \cdot \ddot{O}_3 - C_{\text{аф}}^{\text{е}}, \quad (5.13)$$

где $V_{\text{ж}}$ – производительность по жому (органо-минеральной смеси);

$H_{\text{ж}}$ – норма внесения удобрений; $Z_{\text{аф}}^{\text{е}}$ – затраты на внесение удобрений.

Семена сорных трав, содержащихся в исходном навозе, после сбраживания теряют всхожесть, поэтому при использовании отферментированной массы и обезвоженного шлама в качестве удобрений потребность в гербицидах существенно снижается.

Прибыль за счет сокращения расходов на гербициды в случае использования неразделенной отферментированной массы определится по формуле

$$P_2^5 = \frac{V_{\phi}}{H_{\phi}} \cdot m_{\text{аф}} \cdot \ddot{O}_{\text{аф}} + C_{\text{аф}}^{\text{аф}}, \quad (5.14)$$

При использовании обезвоженного шлама:

$$P_2^6 = \frac{V_\phi}{H_\phi} m_{\text{ад}} \ddot{O}_{\text{ад}} + C_{\text{аи}}^{\text{ад}}, \quad (5.15)$$

где $m_{\text{гр}}$ – норма внесения гербицидов; $\Pi_{\text{гр}}$ – стоимость гербицидов;
 $З_{\text{аи}}^{\text{ад}}$ – затраты на внесение гербицидов.

Прибыль, получаемая за счет других факторов (снижения затрат на вывоз и хранение необработанных отходов и др.) зависит от конкретных местных условий.

Величина прибыли, которая может быть получена за счет транспортирования отферментированных жидких стоков по трубам, зависит от расстояния между установкой и полем, наличия на поле систем орошения, от рельефа местности, характера почв и определяется как разность между стоимостью вывоза стоков автотранспортом и стоимостью их транспортирования по трубам.

В некоторых случаях жидкие стоки, полученные после разделения отферментированной массы, подвергаются доочистке. Степень доочистки определяется местными санитарно-гигиеническими требованиями. В частности, стоки, полученные при переработке навоза крупного рогатого скота, разрешается с незначительной доочисткой использовать в качестве смывной жидкости в системе навозоудаления фермы. Жидкие стоки могут также использоваться при производстве биогумуса для увлажнения площадки вермикомпостирования.

Прибыль от использования стоков вместо чистой воды будет зависеть от стоимости воды, которую они заменяют, и определится по формуле

$$D_3^1 = V_{\text{н}}' \ddot{O}_{\text{а}}, \quad (5.16)$$

где $V_{\text{с}}'$ – объем стоков, используемых в системе навозоудаления;
 $\Pi_{\text{в}}$ – цена на воду.

Прибыль, полученная за счет сокращения сроков хранения переработанных отходов по сравнению со сроками хранения исходного сырья в отстойниках-накопителях, определяется следующим образом:

$$D_3^2 = (C_{\text{с}0} - C_{\text{с}1}^{\text{с}}) + C_{\text{с}\xi}, \quad (5.17)$$

$$D_3^3 = (C_{\text{с}0} - C_{\text{сн}}^{\text{с}}) + C_{\text{с}\xi}, \quad (5.18)$$

где $З_0$ – затраты на строительство отстойников до внедрения установки;

$З_{\text{н}}^1$ – затраты на строительство накопителя для хранения исходного сырья;

Z_6^1 – затраты на строительство накопителя для хранения отферментированной массы; Z_3 – плата за землю.

Известно, что обезвоженный шлам является прекрасным сырьем для производства биогумуса с помощью червей – вермикомпостирования. При переработке 1 т обезвоженного шлама получают около 600 кг биогумуса и дополнительно около 100 кг биомассы червей. Тело червей содержит аминокислоты, в том числе особо важные – лизин и метионин, а также многочисленные ферменты, витамины, микроэлементы. Сухое вещество тканей червей содержит сырого протеина – до 60 %, липидов 6–9 %, азотистых экстрактивных веществ от 7 до 16 %. Биомасса червей является природным источником провитамина D, который под действием ультрафиолетовых лучей превращается в витамин D, что значительно повышает питательную ценность биомассы. Добавка червей в количестве 1 % в основной рацион, состоящий из 65 % зерна, 18 % соевых бобов, 8 % пшеничных отрубей, 8 % порошка яичной скорлупы и 1 % минеральных веществ, способствует приросту производства куриных яиц на 25 %, массы кур – на 22 %. Прирост массы рыбы составляет 33,5 % при добавлении в корм 15 % массы червей [14].

Прибыль от использования биогумуса в качестве удобрения:

$$P_3^4 = \frac{V_{\tilde{a}}}{H_{\tilde{a}}} \cdot \Delta \acute{O}_{\tilde{a}} \ddot{O}_{\tilde{a}} - C_{\tilde{a}\acute{a}\tilde{f}}^{\tilde{a}}, \quad (5.19)$$

где $V_{\tilde{a}}$ – производительность установки по биогумусу; $H_{\tilde{a}}$ – норма внесения биогумуса; $Z_{\tilde{a}\acute{a}\tilde{f}}^{\tilde{a}}$ – затраты на внесение биогумуса.

Комплексный подход к решению вопроса утилизации отходов животноводства существенно влияет на экономические показатели сельскохозяйственного производства. Подтверждением тому является опыт Китая. По мере развития рыночных отношений в китайских селах и внедрения в них биореакторов появилась возможность практического использования продуктов метанового сбраживания. Так, в провинции Сычуань, уезд Сяодэ реализована модель замкнутого цикла производства «плоды – свиньи – куры – биогаз – плоды». Плоды фруктовых деревьев и опавшую зелень используют для корма свиней и кур, отходы кур и свиней – для производства биогаза и органических удобрений, которыми удобряют почву под деревьями. Или модель «вино – свиньи – биогаз – электроэнергия – рыба» в уезде Цитянь. Схема следующая: скармливание свиньям отходов винодельческо-

го производства → использование жидких отходов винодельческого производства и экскрементов свиней для получения биогаза → использование биогаза для получения электрической энергии, а отферментированной массы → для кормления рыбы [15].

5.3. Экологическая составляющая экономического эффекта

Величина природоохранного эффекта – суммарного предотвращённого эффекта (ΣY) от загрязнения окружающей среды – может быть весьма значительной, поскольку биогазовые установки обеспечивают эффективное обеззараживание отходов (уничтожение патогенной микрофлоры, гельминтов, резкое снижение общей микробной обсеменённости), их дезодорацию и ликвидацию зловонных запахов на прилегающих к ферме территориях, гарантированное уничтожение всхожести семян сорняков; снижение заболеваемости населения, особенно, обслуживающего персонала фермы. Все процессы загрязнения природной среды трудно учесть и точно оценить величину причинённого ущерба. В настоящее время нет научно обоснованных методик определения ущерба от загрязнения земли, воды, воздуха, и для оценки его величины пользуются эмпирическими данными [16–18].

$$\Sigma Y = Y_{\text{воз}} + Y_{\text{вод}},$$

$Y_{\text{воз}}$ – предотвращённый ущерб от загрязнения воздуха аммиаком, выделяющимся при хранении навоза, грн/год

$$\dot{O}_{\text{атм}} = \gamma \cdot \sigma_{\text{к}} \cdot f_{\text{в}} \cdot m_{\text{NH}_3} \cdot A_{\text{NPK}}, \quad (5.20)$$

где m_{NH_3} – масса выброса аммиака в атмосферу за 9 месяцев хранения навоза:

$$m_{\text{NH}_3} = \frac{A_{\text{NPK}} \cdot V_{\text{год}} \cdot K \cdot 9}{12} \quad (5.21)$$

где A_{NPK} – количество аммиачного азота, теряемого за время хранения одной тонны навоза ($A_{\text{NPK}} = 2,8$ кг/т); $V_{\text{год}}$ – годовое количество навоза, тонн; K – коэффициент потерь аммиачного азота за время хранения ($K = 0,1$); γ – условный множитель, грн/т ($\gamma = 80$); $\sigma_{\text{к}}$ – показатель относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха ($\sigma_{\text{к}} = 10$); $f_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосфере ($f_{\text{в}} = 10$).

Эффект от предотвращения загрязнения прилегающих водоёмов получают за счёт снижения величины БПК₅ в сброженном навозе. В грунтовые

воды вымывается 25 % внесенных загрязнений. Исходя из этого, приведенная масса (М) годового сброса загрязнений в прилегающие водоёмы составляет:

$$M = A_j \cdot b \cdot (M_{\text{АГ}} - M_{\text{АГ}}^{\text{НД}}) \cdot V_{\text{АГ}} \cdot 0,25, \quad (5.22)$$

где $A_j \cdot b$ – показатель агрессивности загрязнений, усл. т/т ($A_j \cdot b = 0,33$); М – содержание загрязнений, кг/т.

Предотвращённый ущерб за счёт снижения загрязнения водоёмов:

$$\dot{O}_{\text{АГ}} = \gamma_{\text{А}} \cdot \sigma_{\text{А}} \cdot M, \quad (5.23)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ – условный множитель, грн/т; $\sigma_{\text{в}}$ – показатель опасности загрязнения водоёма ($\sigma_{\text{в}} = 0,5$).

Пример расчета эколого-экономического эффекта от внедрения биогазовой установки

Исходные данные:

- место строительства – свиноводческий комплекс «Марьяновский» Черкасской области;
- производительность установки по исходному сырью – 90 м³/сут, при влажности сырья 92 %;
- производство обезвоженного шлама – 20 т/сут влажностью 65 %;
- производство жидких стоков – 70 м³/сут;
- производство электроэнергии:
 - для технологических нужд – 470 кВт·ч/сут,
 - товарной энергии – 2770 кВт/сут;
- производство тепловой энергии:
 - для технологических нужд – 5040 кВт/сут,
 - товарной энергии – нет;
- капитальные затраты на внедрение установки – 1908000 грн;
- установка обслуживается в три смены, в каждой смене – двумя аппаратчиками; средняя зарплата – 1500 грн/мес;
- БПК₅^э – 21000 мг/л.
- стоимость 1 кВт·ч электроэнергии 43,0 к/кВт·ч;
- хозяйство, в котором предполагается строительство биогазовой установки, имеет свои пахотные земли, где выращивает зерновые культуры. Перечень культур, занимаемые площади, расход минеральных удобрений приведены в табл. 5.2:

Таблица 5.2 – Расход и стоимость минеральных удобрений, внесенных под посевы

Культура	Площадь, га	Внесено удобрений		
		Наименование	Количество, т	Цена, грн/т
Пшеница	100	туковая смесь	29,3	2800
		ам.селитра	20,3	1950
Тритикале	228	туковая смесь	51,3	2800
		ам.селитра	27,9	1950
Ячмень	494	туковая смесь	48	2800
		ам.селитра	70,8	1950
Кукуруза	509	туковая смесь	51	2800
		карбамид	31	2850
		безводный аммиак	14	2280

Эколого-экономический эффект определится по соотношению:

$$\Xi = P + Y - Z,$$

Хозяйственный эффект P для данного хозяйства будет состоять из суммы доходов от использования продуктов переработки навоза:

$$D = D_1 + D_2^1 + D_2^2,$$

где D_1 – прирост доходов от использования биогаза;

D_2^1 – прирост доходов от использования обезвоженного шлама;

D_2^2 – прирост доходов от использования жидких стоков

Y – предотвращенный ущерб за счёт снижения загрязнения водоёма.

При использовании биогаза для производства электрической энергии P_1 определяется следующим образом:

- производство товарной электрической энергии составляет:

$$2770 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут} \times 356 = 1011050 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$$

$$P_1 = 1011050 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год} \times 0,43 \text{ грн/кВт} \cdot \text{ч} = 434751,5 \text{ грн.}$$

Исходя из имеющихся данных о величине посевных площадей в хозяйстве и возделываемых культурах, а также о расходе минеральных удобрений, определим количество азота, фосфора и калия, вносенных в почву. Расчет произведем исходя из того, что туковая смесь содержит 17 % N, 17 % P, 17 % K; аммиачная селитра – 34 % N, нитроаммофоска – 17 % N, 17 % P, 17 % K. Результаты расчета сведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Количество питательных элементов, внесенных в почву

Культура	Площадь, га	Вносится в почву		
		Наименование	Всего, т	В пересчете на N, P, K, кг

		минудобрений		N	P	K
Пшеница	100	туковая смесь	29,3	4980	4980	4980
		ам. селитра	20,3	6902	–	–
Тритикале	228	туковая смесь	51,3	8720	8720	8720
		ам. селитра	27,9	9486	–	–
Ячмень	494	нитроамофоска	48	8160	8160	8160
		ам. селитра	70,8	24072	–	–
Итого				62320	21860	21860

Из таблицы видно, что под пшеницу всего внесено 11882 кг азота, 4980 кг фосфора, 4980 кг калия. Следовательно, в расчете на 1 га внесено 118, 82 кг азота, 49,8 кг фосфора, 49,8 кг калия, что соответствует нормам стандартного минерального удобрения N118P49K49. Под тритикале внесено 18206 кг азота, 8720 кг фосфора и 8720 кг калия. На 1 га внесено соответственно 80 кг азота, 38 кг фосфора и 38 кг калия, что соответствует нормам стандартного минерального удобрения N80P38K38. Под ячмень внесено 32232 кг азота, 8160 кг фосфора и 8160 кг калия. На 1 га внесено 65 кг азота, 17 кг фосфора и 17 кг калия, что соответствует нормам стандартного минерального удобрения N65P17K17.

Далее определим количество удобрительных элементов в обезвоженном шламе, получаемом на установке. Объем производства обезвоженного шлама составляет $20 \text{ т/сут.} \times 365 = 7300 \text{ т/год}$. Согласно анализам сухое вещество исходного навоза содержит 3,4 % N, 2,5 % P, 1,7 % K. При использовании шнековой центрифуги для разделения отферментированной массы в обезвоженный шлам уходит 75 % удобрительных элементов, тогда содержание азота в шламе составит 2,55 %, фосфора – 1,87 %, калия – 1,3 %.

При влажности шлама 65 % количество сухого вещества в нем будет $0,35 \times 20000 \text{ кг/сут.} = 7000 \text{ кг/сут.}$, а количество удобрительных элементов соответственно:

$$N - 7000 \times 0,0255 = 178,5 \text{ кг/сут.} \times 365 = 65152 \text{ кг/год},$$

$$P - 7000 \times 0,0187 = 130 \text{ кг/сут.} \times 365 = 47450 \text{ кг/год},$$

$$K - 7000 \times 0,013 = 91 \text{ кг/сут.} \times 365 = 33215 \text{ кг/год}.$$

Из расчета видно, что масса удобрительных элементов, содержащихся в шламе, превышает их количество, внесенное с минеральными удобрениями. Если под пшеницу вносить 13,2 т/га, под тритикале – 8,9 т/га, под ячмень – 7,2 т/га шлама, то количество удобрительных элементов, внесен-

ных за год, будет соответствовать их количеству, вносимому с минеральными удобрениями. Экономия средств, полученная за счет отказа от минеральных удобрений, будет эквивалентна прибыли P_2^1 от использования обезвоженного шлама в качестве удобрения.

В частности, за счет экономии туковой смеси прибыль составит:

$$29,3 \text{ т} + 51,3 \text{ т} = 80,6 \text{ т} \times 2800 \text{ грн/т} = 225680 \text{ грн.};$$

- за счет экономии ам. селитры: $20,3 \text{ т} + 27,9 \text{ т} + 70,8 \text{ т} = 119 \text{ т} \times 1950 \text{ грн/т} = 224196 \text{ грн.};$

- за счет экономии нитроаммофоски: $48 \text{ т} \times 2800 \text{ грн/т} = 134400 \text{ грн.}$

Всего $P_2^1 = 584276 \text{ грн/год.}$

Производство жидких стоков составляет $70 \text{ м}^3/\text{сут} \times 365 = 25550 \text{ м}^3/\text{год.}$ Учитывая, что в жидких стоках содержание удобрительных элементов ниже, чем в шламе, их предпочитают использовать для подкормки растений. При норме внесения $80\text{--}100 \text{ м}^3/\text{га}$ этими стоками можно обработать $255,5 \text{ га}$, что составляет половину площади посевов кукурузы. Следовательно, для удобрения этих посевов использование минеральных удобрений можно сократить вдвое. Соответственно необходимое количество туковой смеси составит: $51 \text{ т} : 2 = 25,5 \text{ т.};$ карбамида – $31 \text{ т} : 2 = 15,5 \text{ т.};$ безводного аммиака – $14 : 2 = 7 \text{ т.}$

Стоимость сэкономленных минеральных удобрений будет:

туковой смеси – $25,5 \text{ т} \times 2800 \text{ грн/т} = 71400 \text{ грн};$

карбамида – $15,5 \text{ т} \times 2850 \text{ грн/т} = 44175 \text{ грн};$

безводного аммиака – $7 \text{ т} \times 2280 \text{ грн/т} = 15960 \text{ грн.}$

Всего $P_2^2 = 131535 \text{ грн/год.}$

Величина предотвращенного ущерба $У$ за счет снижения выброса стоков в водоем:

$$Ó = \gamma \sigma_{\text{к}} \dot{I} \text{ ,}$$

где γ – множитель, численное значение которого принято $80 \text{ грн/усл. т. выбросов};$

$\sigma_{\text{к}}$ – константа для русла Днепра в Черкасской области; принимаем равной $2,33;$

M – масса годового сброса органического вещества, $\text{кг/т};$

$$\dot{I} = \dot{A}_i m_i V \text{ ,}$$

где A_i – показатель относительной опасности, усл. т/т $A_i = 0,33.$

m_i – масса упрежденного сброса, полученная за счёт снижения величины БПК₅ в сброженном навозе (БПК₅^И = 21 кг/т, БПК₅^С = 1,2 кг/т);

V – годовой выход навоза: $90 \text{ т/сут} \times 365 = 32850 \text{ т/год}$.

$$\dot{O} = \gamma \sigma_3 \dot{I} = \gamma \sigma_3 \dot{A}_i (\dot{A}_i \hat{E}_5^e - \dot{A}_i \hat{E}_5^n) \cdot V,$$

$$\dot{O} = 80 \times 2,33 \times 0,33 (21 - 1,2) 32850 = 40000 \text{ кг/год}$$

Величина затрат на внедрение установки:

$$C_{\Sigma} = \tilde{N} + E_i \hat{E},$$

где K – капитальные затраты, 1908000 грн;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,

$E_n = 0,15$; C – эксплуатационные затраты:

$$C = 365 \cdot W_{\Sigma} \ddot{O}_{\Sigma} + C_{\Sigma} \cdot n \times 12,$$

где W_{Σ} – суточное потребление электроэнергии, 470 кВт·ч/сут;

Π_{Σ} – цена на электроэнергию, 0,43 грн/кВт;

Z_n – зарплата оператора, 1500 грн/месяц;

n – количество операторов, $n = 6$ чел.

$$C = 365 \times 470 \times 0,43 + 1500 \times 6 \times 12 = 181766,5 \text{ грн/год}$$

$$C_{\Sigma} = 181766,5 + 0,15 \times 1908000 = 467966,5 \text{ грн/год}$$

$$\dot{Y} = D_1 + D_2^I + D_2^2 + \dot{O} - C_{\Sigma} = 434751,5 + 584276 + 131535 + 40000 - 467966,5 = 722596 \text{ грн/год}$$

$$\text{Окупаемость: } \frac{\hat{E}}{\dot{Y}} = \frac{1908000}{722596} = 2,64 \text{ года}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биогазовые технологии – один из основных и наиболее рациональных путей обезвреживания органических отходов, и сейчас их внедрению нет альтернативы, так как только они могут обеспечить решение проблем энергетики, агрохимии и экологии во многих отраслях производства, особенно – в агропромышленном комплексе. Биогазовые проекты в сельскохозяйственном секторе имеют огромный потенциал и очень интересны инвесторам, так как на фоне роста цен на газ и электроэнергию даже инвестиции в дорогостоящее оборудование для производства биогаза могут окупиться довольно быстро – в среднем за пять-шесть лет.

Биогаз имеет значительное преимущество перед другими ВИЭ: в отличие от энергии ветра и солнца он является стабильным производителем энергии. По мнению отечественных и зарубежных специалистов, в частности, Э. Кудурса, эксперта Европейско-украинского энергетического агентства, в Украине необходимо на государственном уровне «...поддерживать биогазовые установки так же, как и солнечную энергетику, и даже больше» и тогда «...в аграрном секторе произойдет стремительное развитие. Будет строиться большое количество биогазовых установок. В аграрных компаниях повысятся доходы от сельскохозяйственной деятельности». Это окажет позитивное влияние на развитие сельской местности, будет способствовать ее благоустроенности, созданию новых рабочих мест и соответственно новых дополнительных возможностей для развития региональной экономики. Включение биогаза в энергетический баланс возобновляемых

источников энергии и экономия в энергопотреблении повысят уровень энергетической безопасности Украины, сделают ее независимой от импорта природного газа. Рациональное использование собственных энергетических ресурсов станет залогом будущей экономической и политической стабильности и дальнейшего устойчивого развития страны.

Список литературы

К введению

1. Волова Т.Г. Биотехнология / Т.Г. Волова. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999.
2. Гелетуха Г.Г. Аналіз розвитку секторів біоенергетики в європейському союзі / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Желесна, О.І. Дроздова, Г.І. Гелетуха // Пром. теплотехніка. – 2011. – Т.33, № 2. – С. 71–77.
3. Ясенецкий В.И. Мировые тенденции развития биогазовых технологий / В.И. Ясенецкий, В.И. Клименко // Пропозиція. – 2001. – № 12. – С. 18–22.
4. Шацький В.В. Виробництво біогазу в сільському господарстві України / В.В. Шацький, Г.Є. Мовсесов, В.М. Павліченко // Науковий вісник Національного аграрного університету – 2004. – № 73, частина І. – С. 104–107.
5. Гелетуха Г.Г. Нужен ли Украине биогаз / Г.Г. Гелетуха // Интернет <http://obozrevatel.com> 20.02. 2012.
6. Гелетуха Г.Г. Возобновляемая энергетика в Украине: стимулы и барьеры / Г.Г. Гелетуха // Интернет "[Українська енергетика UA-Energy.org](http://UkrainianEnergy.org)" 09.12.2011.

К главе 1

1. Омелянский В.Л. Избранные труды / В.Л. Омелянский. – М. : Изд-во АН СССР, 1953.

2. Панцхава Е.С. Биомасса как дополнительный источник топлива. Получение биогаза / Е.С. Панцхава, И.В. Березин // Биотехнология. – 1986.– №2.– С. 1–12.
3. Мкинерни М. Основные принципы анаэробной ферментации с образованием метана / М. Мкинерни, М. Брайант. // в кн. Биомасса как источник энергии – М.: Мир, 1985.
4. Барнес Д. Анаэробные процессы очистки сточных вод / Д. Барнес, П. Фитцджеральд. // В кн: Экологическая биотехнология. – Л. : Химия, 1990, С. 37–89.
5. Панцхава Е.С. Получение газообразного и жидкого топлива / Е.С. Панцхава. // В кн. Промышленная микробиология – М. : Высш. шк, 1989, С. 617–634.
6. Barker H.A. Biological formation of methane / H.A. Barker Bacterial fermentations. – New York, 1956.
7. McCarty P.L. Anaerobic wastewater treatment fundamentals / P.L. McCarty // Public Works, 1964.
8. Калюжный С.В. Биогаз: проблемы и решения / С.В. Калюжный, А.Г. Пузанков, С.Д. Варфоломеев; под ред. П. В. Нестерова. – М. : Итоги науки и техники. сер. «Биотехнология», ВИНТИ, 1988, т. 21.
9. Дубровский В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. – Рига : «Зинатне», 1989.
10. Панцхава Е.С. Научные основы получения метана из биомассы. / Е.С. Панцхава. – В сб. «Преобразование солнечной энергии». – М. : Наука, 1985, С. 147–154.
11. Новикова Ю.А. Биомасса как источник энергии / Ю.А. Новикова. Химическая промышленность за рубежом. – М. : НИИТЭХИМ, 1989, вып. 10 (322). – С. 1–35
12. Кучерук П.П. Оценка производства биогаза в Украине / П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев, И.М. Мушинская, Т.В. Ходаковская // Сотрудничество для решения проблемы отходов: 7-я междунар. конф., 7–8 апр. 2010г. : тезисы докл. – Х., 2010. – С. 100–101.
13. Гелетука Г.Г. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідки біопалива, біогаз / Г.Г Гелетука, Т.А. Железна, М.М. Жовмір та ін. // Пром. теплотехніка. – 2011. – Т. 33, № 1. – С. 57–64.

14. Долинский А.А. Энергоплантации: барьеры и компромиссы / А.А. Долинский, Б.И. Басок, Е.Т. Базеев / Энергия из биомассы: VI междунар. конф., 22–24 сент. 2008 г. : тезисы докл. – К., 2008: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2008.
15. Артамонов В.Н. Биотехнология – агропромышленному комплексу / В.Н. Артамонов. – М.: Наука, 1989.
16. Статистический ежегодник Украины / К.: Госкомстат Украины, 2009
17. Вашкулат Н.П. Гигиена животноводческих комплексов и охрана окружающей среды / Н.П. Вашкулат, Е.И Гончарук, Я.И. Костовецкий. – К.: Здоровье, 1985.
18. Никитин Д.П. Крупные животноводческие комплексы и окружающая среда / Д.П. Никитин. – М.: Медицина, 1980.
19. Диас Д. Остатки и отходы / Д. Диас, К. Голуек. // в кн. Биомасса как источник энергии – М.: Мир, 1985.
20. Гюнтер Л.И. Роль углеводов, жиров и белков в газообразовании при сбраживании канализационных осадков в метантенках / Л.И. Гюнтер // Сборник научных трудов АКХ им. Памфилова. – 1961. – Вып. 6. – С. 18–19.
21. СНиП 2.04.03 – 85 Канализация. Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат, 1986.
22. Баадер В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Брендорфер. – М.: Колос, 1982.
23. Беккер М.Е. Трансформация продуктов фотосинтеза / М.Е. Беккер, Ю.Э. Швинка. – Рига, Зинатне, 1984.
24. Криворучко В. / Использование биомассы в биогазовых установках с целью обеспечения сельского хозяйства электроэнергией и выполнение Киото-протокола / В. Криворучко, Т. Амон, Б. Амон, К. Хопфнер-Сикст, В.О. Дубровин / Энергия из биомассы: I междунар. конф., 23–27 сент., 2002 г. : тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002.
25. Янко В.Г. / Обработка сточных вод и осадка в метантенках / В.Г. Янко, Ю.Г. Янко. – Киев, Будівельник, 1978.
26. Ткач Г.А. / Ферментер для получения биогаза из отходов свиноводческих ферм объемом 310 м³ / Г.А. Ткач, И.В Семененко, М.Г. Зинченко // Расчет и конструирование биотехнической аппаратуры. Межвузовский сборник. – М: МИХМ, 1988. – С. 27–31.

27. Гелетуха Г.Г. / Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы (Обзор) / Г.Г. Гелетуха, С.Г. Кобзарь // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 4. – С. 3–10.

28. Абрамович И.А. / Энергетическое использование ресурсов биомассы бытовых отходов и осадков сточных вод населенных пунктов Украины / И.А. Абрамович, И.Л. Бондарь, А.С. Ютина // Энергия из биомассы: I междунар. конф., 23–27 сент. 2002 г. : тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002.

29. Вода и сточные воды пищевой промышленности / пер. с польск. В.М. Каца. – М.: Пищевая промышленность, 1972.

30. Кошель М.И. / Получение биогаза из отходов спиртовых заводов / М.И. Кошель, Ю.Л. Каранов, В.В. Рудая и др. // Энергия из биомассы: I междунар. конф., 23–27 сент. 2002 г. : тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002.

31. Гелетуха Г.Г. Ключові проблеми розвитку сектору біомаси біопалив в Україні / Г.Г. Гелетуха // Энергия из биомассы: V междунар. конф., 22–23 сент. 2009 г.: тезисы докл. – К., 2009: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2009.

32. Панцхава Е.С. Техническая биоэнергетика / Е.С. Панцхава. – М.: Знание, 1990.

33. Матвеев Ю.Б. Биогазовые проекты в Украине – текущий статус и экономические условия / Ю.Б. Матвеев // Энергия из биомассы: V междунар. конф., 22–23 сент. 2009 г.: тезисы докл. – К., 2009: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2009.

34. Розанова Е. П. Микрофлора нефтяных месторождений / Е. П. Розанова, С. И. Кузнецов. – М. : Наука, 1974.

35. Биотехнология : учеб. пособ. в 8 кн./ под ред. Н.С Егорова. Кн. 1. Проблемы и перспективы. – М.: Высш. шк, 1987.

36. Богданов П.В. Основные факторы, влияющие на интенсивность анаэробного сбраживания навоза / П.В. Богданов, В.М. Шрамков, С.В. Дурдыбаев // Исследование, проектирование и строительство систем сооружений метанового сбраживания навоза : междунар. конф. : тезисы докл. – М., 1982. – С. 29–31.

37. Смирнов О.П. Исследование процесса метанового сбраживания птичьего помета / О.П. Смирнов, Л.Г.Баркалов // Исследование, проекти-

рование и строительство систем сооружений метанового сбраживания навоза : междунар. конф.: тезисы докл. – М., 1982. – С. 17–19

38. Зинченко М.Г. Оптимизация процесса метанового сбраживания отходов животноводческих комплексов / М.Г. Зинченко, Н.А. Цейтлин, И.В. Семененко // Химическое и нефтяное машиностроение. – М., 1990. – № 4, С. 18–22.

39. Туровский В.С. Обработка осадка сточных вод / В.С. Туровский. – М. : Стройиздат, 1982.

40. Кигель Е.М. Эксплуатация канализационных очистных сооружений / Е.М. Кигель. – К. : Будивельник, 1978.

41. Смирнов О.П. Применение метанового сбраживания для утилизации стоков свиноводческих комплексов / О.П. Смирнов, К.П. Цыганков, Н.В. Коваль // Исследование, проектирование и строительство систем сооружений метанового сбраживания навоза : междунар. конф. : тезисы докл. – М., 1982. – С. 44–46.

42. Кантере В.М. Теоретические основы технологии микробиологических производств / В.М. Кантере. – М. : Агропромиздат, 1990.

43. Чурбанова И.Н. Микробиология / И.Н. Чурбанова. – М. : Высш. шк, 1987.

44. Семененко И.В. Обоснование загрузки биоэнергетической установки. / И.В. Семененко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. –1991. – № 12. – С. 16–17

45. Зубко Б.И. Особенности технологии переработки и обеззараживания жидкого навоза в процессе анаэробно-метанового брожения / Б.И. Зубко, А.П. Новосельская, Ю.А. Драч // Биологическая переработка отходов: междунар. конф. : тезисы докл. – К. : 1983. – С. 91–94.

46. Hashimoto A.G. Effect of mixing duration and vacuum on methane production rate from beef cattle waste / A.G. Hashimoto // Biotechnology Bioenginiring. – 1982. – Vol. 24. – P. 9–23.

47. СН 173-61 Указания по проектированию наружной канализации промышленных предприятий. Часть I, Госстройиздат, 1961.

48. Mignone N.A. Survey of anaerobic digestion. Supernatant treatment alternatives / N.A. Mignone // Water Sewage Works. – 1977.

49. Панцхава Е.С. Влияние иммобилизации, молекулярного водорода, этана и метана на активность ассоциации метангенерирующих бактерий /

Е.С. Панцхава, Ю.Р. Малашенко, В.И. Карпенко, Чан Динь Тоай, С.Д. Малащенко // Прикладная биохимия и микробиология. – 1984. Т 20, вып. 3. – С. 340–349.

50. Lettinga G., de Zeeuw W.S. // Proc. Europ. Symp. Anaerobic wastewater treatment fundamentals (Neerdwijkerhout, Netherlands, 23-25. 11. 1983) – P. 348–368.

51. Калюжный С.В. Анаэробная биологическая очистка сточных вод / С.В. Калюжный, Д.А. Данилович, А.Н. Ножевникова; под ред. С.Д. Варфоломеева. – М.: Итоги науки и техники. Сер. «Биотехнология», ВИНТИ, 1991, т. 29.

52. Callander I.J. Recent advances in anaerobic digestion technology / I.J. Callander, J.P. Barford // Process Biochemistry. – 1983. – Aug. – P. 24–30.

53. Lettinga G., Hulsoff – Pol L. //Proc. Int. Course on Anaerobic Waste Water Treatment, 25.07-03.08.90. Ed. Agricultural University, Wageningen, (Holland)

54. Просвирнин В.Ю. Имитационное моделирование анаэробного сбраживания птичьего помета / В.Ю. Просвирнин, В.К. Евтеев // Анаэробная биологическая обработка сточных вод : междунар. конф., 15–17 нояб. 1988 г. : тезисы докл. – Кишинев, 1988. – С. 16–121.

55. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман – М.: Мир, 1977.

56. Семенов И.В. Проектирование биогазовых установок / И.В. Семенов. – Сумы. : ВФ «МакДен», 1996.

К главе 2

1. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною: ВНТП-АПК-09.06. – К. : УкрНДІагропроект, 2006.

2. Письменов В.Н. Получение и использование бесподстильного навоза / В.Н. Письменов. – М. : Росагропромиздат, 1988.

3. Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета. – М. : Минсельхоз СССР, 1983.

4. Васильев В.А. Применение бесподстильного навоза для удобрения / В.А. Васильев, М.М. Шведов. – М. : Колос, 1983.

5. Бацанов И.И. Уборка и утилизация навоза на свиноводческих ком-

плексах / И.И. Бацанов, И.И. Лукьяненко. – М. : Россельхозиздат, 1977.

6. Технологический регламент комплекса оборудования биоэнергетической установки с реактором 125 м³ К-Р-9-1 для анаэробного сбраживания навоза. – Запорожье. : Коммунар, 1989.

7. Украина: Эффективность малой энергетики. – К. : Энергетический центр ЕС в Киеве (Программа TESIS), 2001.

8. Заворотний В.П. Внедрение когенерационной биогазовой установки на свиноферме в с. Еленовка Днепропетровской области / В.П. Заворотний, К.А. Копейкин, О.П. Смирнов, А.И. Талько // Энергия из биомассы: I междунар. конф., 23–27 сент. 2002 г.: тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002.

9. Семененко И.В. Разработка интенсивной технологии переработки отходов животноводческих комплексов в биогаз и удобрения : автореф. дис. канд. техн. наук : 03.00. 23 / Семененко Иван Васильевич. – К., 1987. – 24 с.

10. Семененко И.В. Комплексная переработка отходов животноводства с получением органических удобрений и биогаза / И.В. Семененко, В.А. Кравец // Энергия из биомассы: I междунар. конф., 23–27 сент. 2002 г. : тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002.

11. Ясинский В.И. Мировые тенденции развития биогазовых установок / В.И. Ясинский, В.Н. Клименко. – К. : Пропозиція, 2001.

12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М. : Госхимиздат, 1960.

13. Янко В.Г. Обработка сточных вод и осадка в метантанках / В.Г. Янко, Ю.Г. Янко. – Киев. : Будівельник, 1978.

14. Ананиашвили Г.Д. Основы биоэнергетики и биоэнергетического строительства в сельском хозяйстве: автореф. дис. докт. с.-х. наук : 06.01.03 / Ананиашвили Георгий Давидович. – М., 1959. – 29с.

15. Никитин Д.П. Метановое брожение в биотехнологии / Д.П. Никитин. – К. : Вища школа, 1990.

16. Никитин Д.П. Окружающая среда и человек / Д.П. Никитин, Ю.В. Новиков. – М. : Высш. шк., 1980.

17. Дубровский В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. – Рига. : Зинатне, 1988.

18. Berg L., van den. Anaerobic digestion of wastes / L. Berg van den. //

Conservation Recycling – 1982, – Vol. 5, № 1.– P. 5–14.

19. Daniels L. Biological methanogenesis: physiological and practical aspects / L. Daniels // Trends Biotechnol – 1984, – Vol 2, № 4. – P. 91–98.

20. Баадер В., Биогаз. Теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер. – М. : Колос, 1982.

21. Состояние и перспективы развития биогазовых установок / Госагропром СССР. – М. : ЦНИИТЭИ, 1981. – 29 с.

22. Семененко И.В., Якушко С.И. Аппарат для ферментации навоза. А.С. № 1386650 СССР. Заявл. 24.04.1987; Опубл. 04.03.1986; Бюл. № 38.

23. Жуков А.И. Методы очистки производственных сточных вод / А.И. Жуков, И.Л. Могайт, И.Д. Родзиллер. – М. : Стройиздат, 1977.

24. Яковлев С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. – М. : Стройиздат, 1980.

25. Bryant M.P. Microbial methane production – theoretical aspects / M.P. Bryant // Journal of animal science. – 1979. – Vol 48, №1. – P. 263–268.

26. Brumm T. I. Dilute swine waste treatment in an anaerobic filter / T. I. Brumm , I.C. Nye // Proc. 36th Indust. waste conf., Purque Univ. – Ann. Arbor, 1982

27. Fischer I.R. Production of methane gas from combination of wheat strow and swine manure / I.R. Fischer // Trans. ASAE. – 1983. – Vol. 26. – P. 546–548

28. Hashimoto A.G. Methane from swine manure: Effect of temperature and influent substrate concentration on cinetic parameter (K) / A.G Hashimoto //Agr. Wastes. – 1984. – Vol. 9. – P. 299–308

29. Cseh T. Two phase anaerobic fermentation of liguid waste to methane / T. Cseh, L. Czaco // Biotechnol. Bioeng. – 1984 – Vol. 26. – P 1425–1429

30. Whilte L.P. Biomass as fuel / L.P. Whilte, L.G. Plasnett. – Academic Press, 1981.

31. Jain M.K. Biogas plant. An alternative tecnology and manure / M.K. Jain, M.M. Mishra // Food Farming Agr. – 1978. – Vol. 9. № 10. – P. 292–296.

32. Velsen A.F. Anaerobic Aigestion of piggery waste / A.F. Velsen. – Wageningen (The Nettherland), 1981.

33. Jain M.K. Anaerobic digestion of cattle and sheep wastes / M.K Jain, R. Singh // Agr. Wastes. – 1981. – Vol. 3. – P. 65–73

34. Hayes T.D. Anaerobic digestion of cattle manure / T.D. Hayes, W. J. Jewell., S. Dell'orto, et al // Anaerobic digestion / Ed. by D.A. Stafford et al – London, 1980. – P. 255–288.
35. Hashimoto A.G. Methane from swine manure: Effect of temperature, hydraulic retention time and influent substrate concentration on cinetic paramete (K) / A.G. Hashimoto // Biotechnol. Bioeng. – 1982 – Vol. 24. – P 2039–2052.
36. Hashimoto A.G. Performance of a pilot-scale thermophilic, anaerobic fermentation treating cattle waste / A.G. Hashimoto //Resources Conservation. – 1982. – Vol. 8. – P. 3–17.
37. Morrison S.R. Biogas from poultry manure: Volatile solids loading rate and hydraulic detention time process / S.R. Morrison // 4 th Intern. symp. livestock wastes. – Amarilo (Tex.). 1980. – P. 96.
38. Hills D.I. Environment and health. Chemical characteristics of and methane prodaction from turkey manure / D.I. Hills // Poultry Set. – 1982 – Vol. 61. – P 677–682.
39. Hawkes D.L. Factors affecting net energy production from mesofilic anaerobic digestion / D.L. Hawkes // Proc. Ist. Intern. symp. on anaerobic diges- tion. Sept. 1979. Cardiff. Wales. – Amsterdam etc., 1982. – P. 131–149.
40. Lafon P. L'avenir du gaz de famier / P. Lafon // Elevage Bovin - Ovin- caprin. – 1980 – № 92. – P. 67–74.
41. Engahuber M. Energetische Aspecte der Biogasproduction / M. Enga- huber // Agrartecnic. – 1982, № 32. – P. 537–541.
42. Lauer K.H. Die Erzeugung von Erdgas H aus Klaz und Deponiegas / K.H. Lauer, P. Lehrer // GWF. Gas/ Erdgas. – 1985 – № 126, P. 53–65.
43. Фокина В.Д. Переработка навоза в биогаз: Обзорная информ. / В.Д. Фокина, А.Н Хитров. – М. : ВАСХНИЛ, 1981.
44. Bodria L. Generatory a biogas ed a biomasse. / L. Bodria, G.Riva // Electrotechnika. – 1986. – Vol. 13, № 10. – P. 945–950.
45. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки. / Д. Бойлс; пер. с англ. М. Ф. Пушкарев; под ред. Е.А. Бирюковой. – М.: Прогресс, 1987.
46. Дубровский В.С. Получение биогаза из отходов свиноводческого комплекса / В.С. Дубровский // Тр. латв. с.-х. академии – 1985. – № 228, – С. 61–63.
47. Antore A. Bruleurs adaptes a la combustion du diogaz / A. Antore,

D. Deschamps, B. Bournardet // *Revue generale de theruigue*. – 1983. – № 256. – P 341–347.

48. Справочник по сжиженным углеводородным газам / Стаскевич Н.Л., Вигдорчик Д.Я. – Л. : Недра, 1986.

49. Egger K. Wirkungsgrad mit richtig eingestellten Biogasbreannern. / K. Egger // *Schweizer Landtechnik*. – 1987. – Vol. 49, № 14. – P. 31–34.

50. Мариненко Е.Е. Экологические аспекты использования биогаза в СССР и за рубежом / Е.Е. Мариненко, Г.П. Комина. – М. : ВНИИЭгазпром, 1990.

51. Ahlers R. Biogas-Nutrung Erfahrungen und uberlegungen / R. Ahlers, H. Ahigrim // *Grundlagen der Landtechnik*. – 1987. – № 3. – P. 10–14.

52. Werner U. Aufbereitung von Bio- und Erdgasen wit Membranverfahren / U. Werner // *GMU. Gas / Erdgas*. – 1985. – № 126. – Н. 1 – P. 25–29.

53. Семененко И.В. Установка для сжатия биогаза / И.В. Семененко, В.Е. Шуваев, Н.Г. Феденко // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 1990. – № 11. – С. 24–25.

54. Dohne E. Stromerzeugung aus Biogas / E. Dohne // *Landtechnik*. – 1980. – Vol. 35, No. 8/9. – P. 374–376

55. Херннинг Люнgeo Фогет. Навоз – это большая ценность / Херннинг Люнgeo Фогет, М.О. Шикyла, О.Л. Тохна. – К. : Техника, 2002.

56. Форстер Д. Экологическая биотехнология / Д. Форстер. – Л.: Химия, 1990.

57. Лукьяненко В.М. Центрифуги / В.М. Лукьяненко, А.В. Таранец. – М. : Химия, 1988.

58. Вермикультура: производство и использование / М.Ф. Повхан, И.А. Мельник, В.А. Андриенко и др. – К. : УкрИНТЭИ, 1994.

59. Сертификат № 15 на вермикомпост (биогурус) от 2.04.2001 г., ОАО «Экола», г. Кременчуг.

60. Временные рекомендации по использованию вермикомпоста по ТУ.У. 13530137001,95. Государственный сельскохозяйственный институт. – Полтава, 2000

61. Семененко І.В., Зінченко М.Г., Циганков С.П. та ін. Спосіб очищення стічних вод та установка для його здійснення. Патент № 11138 України. Опубл. 25.12.1996; Бюл. № 4.

К главе 3

1. Двухступенчатая биогазовая установка Швартинг / Проспект фирмы Schwarting KG. – 1985. 4с.
2. Велез Д. Производство и использование биогаза на сельскохозяйственных предприятиях / Д. Велез // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1984. – № 5. – С. 79–83.
3. Stastni M. Biogas production and exploitation (Review) / M. Stastni, H. Grimmova. – Praha. : Techn., 1981.
4. Дубровский В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В.С Дубровский, У.Э. Виестур. – Рига. : Зинатне, 1988.
5. Технологический регламент комплекса оборудования биоэнергетической установки с реактором 125 м³ К-Р-9-1 для анаэробного сбраживания навоза. – Запорожье. : Коммунар, 1989.
6. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок / И.В. Семененко. – Сумы. : ВФ «МакДен», 1996.
7. Семененко И.В. Комплексная переработка отходов животноводства с получением органических удобрений и биогаза / И.В. Семененко, В.А.Кравец // Энергия из биомассы: I междунар. конф., 23–27 сент. 2002 г.: тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf 2002>.
8. Матвеев Ю.Б. Опыт эксплуатации биогазовой установки на свиноферме компании «Агро-Овен», Днепропетровская область / Ю.Б. Матвеев, М.Н.Уланов // Энергия из биомассы: II междунар. конф., 20–22 сент. 2004 г. : тезисы докл. – К., 2004: <http://www.biomass.kiev.ua/conf 2004>.

К главе 4

1. Назаренко Л.С. Коррозионная стойкость углеродистой стали и цинковых покрытий в атмосфере животноводческих помещений / Л.С. Назаренко, В.И. Новгородский // Защита металлов. – 1982. – Т. XVIII, №1. – С. 58.
2. Рогокина Е.П. Коррозия алюминиевых сплавов в сельскохозяйственных сооружениях / Е.П. Рогокина // Защита металлов. – 1983. – Т. XIX, №6. – С. 879.
3. Рязанов В.Е. Коррозия конструкционных материалов в атмосфере животноводческих комплексов / В.Е. Рязанов, Г.И. Январов // Защита металлов. – 1981. – Т. XVII, №4. – С. 465.

4. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств / Г.Я. Воробьева. – М. : Химия, 1975.
5. Коррозионная стойкость металлов и сплавов : справочник / сост. Дятлова В.Н. – М. : Машиностроение, 1964.
6. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей и чистых металлов : справочник / Туфанов Д.Г. – М. : Металлургия, 1973.
7. Кононова М.Д. Определение критической концентрации хлоридов, инициирующей язвенную коррозию углеродистой стали в нейтральных водных растворах / М.Д. Кононова, В.В. Юдина, Р.В. Арутюнян // Защита металлов. – 1974. – Т. X, вып. 4. – С. 420–422.
8. Калужина С.А. Термогальваническая коррозия железа в растворе хлористого натрия в условиях теплопереноса / С.А. Калужина, Э.В. Фетисова // Защита металлов. – 1974. – Т. X, вып. 4. – С. 422–425.
9. Кононова М.Д. Производственный случай питтинговой коррозии нержавеющей стали под действием речной воды / М.Д. Кононова, О.М. Копьева // Защита металлов. – 1978. – Т. XIV, вып.5. – С. 575–576.
10. Виноградов В.Н. Особенности коррозионно-механического изнашивания сталей в среде влажного углекислого газа / В.Н. Виноградов // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – 1982. – №. 7. – С. 4.
11. Кузнецов В.П. Прогнозирование и механизм углекислотной коррозии газопромыслового оборудования / В.П. Кузнецов // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – 1978. – №2. – С. 5–6.
12. Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения / пер с нем. П. Я. Семенова. – М. : Колос, 1978.
13. Берг А.И. Антикоррозионная защита металлов методом металлизации распылением / А.И. Берг, И.М. Гиливвер. – М. : ЦБНТИ, 1973.
14. Микробная коррозия и ее возбудители / Е.И. Андреюк, В.И. Билай, Э.З. Коваль, И.А. Козлова. – К. : Наукова думка, 1980.
15. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии: Коррозия металлов в промышленности / Ф. Тодт; пер. с нем. Л.И. Акинфиева, А.Е. Егорова, Н.О. Оберштетера, Е.Г Цвинтарного; под ред. Н.Н. Милютина. Л. : Химия, 1976.
16. Carg J.N. Biodeterioration : The Proceedings of the 4th International biodeterioration Sumpsiun / J.N. Carg, B. Sanyal, J.N. Pandey. – Pitman and the Biodeteriorations Society.– Berlin, 1978; London, 1980.

17. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов / Н.Д. Тома-шов. М. : Из-во АН СССР, 1960.
18. Booth J.H. Microbiological corrosion / J.H. Booth. – London. : Mills and Boon Led, 1971.
19. C.A.H. von Wolzogen-Kuhr. Unity of the Anaerobic and Aerobic Iron Corrosion Process in the soil. / C.A.H. von Wolzogen-Kuhr. Paper presented at the National Bureon of standarts. Intern Corrosion Conf Washington. : D.C. Now, 1937.
20. Алексеев Г.Н. Энергоэнтропика / Г.Н. Алексеев. – М. : Знание, 1983.
21. Химическая стойкость стеклопластиков в среде, имитирующей состав навоза-помета / Черватюк В.Ф., Наконечная А.А., Алексеева Е.С., Фурсова Т.В. – М.: Экспресс-информация. Серия Эксплуатация, ремонт, защита от коррозии оборудования и сооружений, НИИТЭХИМ.– Москва : 1986, вып.4.
22. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. – М. : Стройиздат, 1980.
23. Защита от коррозии, старения и биоповреждения машин, оборудования и сооружений : Справочник под редакцией А.А. Герасименко.– М.: Машиностроение, 1987., с.120.
24. Семененко И.В. Исследование коррозии сталей в условиях анаэробной ферментации отходов животноводства / И.В Семененко, В.И. Дзюба // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – №5. – С. 18–20.
25. Семененко И.В. Защита биогазовых установок от коррозии / И.В Семененко, В.И. Дзюба // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – №1. – С. 38–39.
26. Семененко И.В. Защита стальных конструкций от коррозии / И.В Семененко, В.И. Дзюба // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1989. – №7. – С. 15–16.
27. Новгородский В.И. Защитные свойства цинковых покрытий / В.И. Новгородский, Л.С. Назаренко // Сельское строительство. – 1980. – №1. – С. 24–25.
28. Фокин М.Н. Защитные покрытия в химической промышленности / М.Н. Фокин, В.В. Емельянов. – М. : Химия, 1981.

29. UDC 621.69.624.05 GB 4752-84 The National standart of the People's Republic of China. The operation rules for construction of household hudraulic biogas digesters in rural areas.

К главе 5

1. Сельскохозяйственная биотехнология : учеб. / В.С. Шевелуха, Е.А. Калашникова, С.В. Дегтярев и др.; под ред. В.С. Шевелухи. – М. : Высш.шк., 2003.

2. Панцхава Е.С. Высокоэффективные биогазовые технологии и оборудование. Опыт России / Е.С. Панцхава // Энергия из биомассы: I международ. конф., 23–27 сент. 2002 г.: тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002.

3. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок / И.В. Семененко. – Сумы. : ВФ «МакДен», 1996.

4. Hashimoto A.G. Methane production and effect quality from fermentation of beef cottle manure and mollasses / A.G. Hashimoto // Biotechnol. Bioeng. Sump., 1981. – Vol. 11. – P. 325–339.

5. Жимерин Д.Г. Перспективы и задачи / Д.Г. Жимерин // Энергия: экономика, техника, экология. – 1984. – № 11. – С. 2–9

6. Реймерс М.Ф. Будущее начинается вчера / М.Ф. Реймерс // Энергия: экономика, техника, экология. – 1984. – №12. – С. 33–40

7. Семененко И.В. Комплексная переработка отходов животноводства с получением органических удобрений и биогаза / И.В. Семененко, В.А.Кравец // Энергия из биомассы: I международ. конф., 23–27 сент. 2002 г.: тезисы докл. – К., 2002: <http://www.biomass.kiev.ua/conf> 2002

8. Долгов В.С. Гигиена уборки и утилизации навоза / В.С. Долгов. – М. : Россельхозиздат, 1984.

9. Коваленко В.П. Механизация обработки бесподстильного навоза / В.П. Коваленко. – М. : – Колос, 1984.

10. Синяк Ю.В. Возможность экономии природных энергоресурсов за счет анаэробной ферментации органосодержащих веществ / Ю.В. Синяк, А.Х. Авизов // Энергетика. Топливо. – 1984. – №6. – С. 42–58.

11. Легкий В.А. Сравнительная эффективность новых технологий производства электрической и тепловой энергии на основе многокритериальных оценок / В.А. Легкий, Т.С. Земскова // Проблемы энергосбереже-

ния : межвузовский сборник научных трудов. – К. : Наукова думка. – 1993. – Вып. 10. – С. 43–50.

12. Яремчук І.Г. Економіка природокористування : навч. посібн. / І.Г. Яремчук. – К. : – Видав. центр «Просвіта», 2000.

13. Лукьяненко И.И. Приготовление и использование органических удобрений / И.И. Лукьяненко. – М. : – Россельхозиздат, 1982.

14. Вермикультура: производство и использование / М.Ф. Повхан, И.А. Мельник, В.А. Андриенко. – К. : – УкрИНТЭИ, 1984.

15. Чэн Шань Лунь. Развитие всестороннего применения биогаза и экологической экономики в сельских подворьях / Чэн Шань Лунь. – Чэнду : – Чжунго Чжаоци, 1989.

16. Иванов А.Н. Изучение влияния животноводческих комплексов на окружающую среду и инфекционную заболеваемость населения. / А.Н. Иванов // Гигиена и санитария. – 1985. – №9. – С. 13–16.

17. Вашкулат Н.П. Гигиена животноводческих комплексов и охрана окружающей среды / Н.П. Вашкулат, Е.И. Гончарук. – К. : – Здоровье, 1985.

18. Быстров А.С. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Варанкин, М.А. Виленский и др. – М. : Экономика, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
Глава 1. Технологические основы метанового брожения.....	11
1.1 Биохимия и микробиология процесса.....	11
1.2 Исходное сырье и его свойства.....	15
Биомасса как непосредственный продукт фотосинтеза.....	16
1.2.2 Биомасса органических остатков и отходов.....	18
1.3 Основные факторы, влияющие на процесс метанового сбраживания.....	29
1.4 Оптимизация процесса метанового сбраживания органических веществ.....	47
Глава 2. Инженерная реализация технологии метанового сбраживания.....	55
2.1. Подготовка исходного сырья к сбраживанию.....	58
2.1.1 Сбор и накопление исходного сырья.....	58
2.1.2 Подготовка исходного сырья к сбраживанию исходного сырья.....	64
2.2 Установки метанового сбраживания органических отходов. Основные узлы и системы.....	79
2.2.1 Метантенк и его элементы.....	85
2.2.2. Конструктивный и технологический расчет метантенка.....	90
2.3 Система сбора биогаза.....	99
2.3.1 Состав и свойства биогаза.....	99
2.3.2 Подготовка биогаза к использованию.....	105
2.3.3 Оборудование системы сбора и хранения биогаза.....	110
2.4 Использование биогаза для производства тепловой и электрической энергии.....	125
2.4.1 Оборудование для получения тепловой и электрической энергии из биогаза.....	127
2.4.2 Расчет энергетического баланса биогазовой установки.....	130
2.5 Разделение сброженной массы.....	134
2.5.1 Характеристика сброженной массы.....	134
2.5.2 Использование сброженной массы без разделения.....	138
2.5.3 Оборудование для разделения сброженной массы.....	140
2.6 Сбор и использование продуктов разделения сброженной массы.....	143
2.6.1 Использование обезвоженного шлама и жидких стоков в качестве удобрений.....	146
2.6.2 Переработка обезвоженного шлама в кормовые добавки и биогумус.....	168
2.6.3 Использование и переработка жидкой фракции сброженной массы.....	172

2.6.4 Оборудование для сбора и использования продуктов разделения сброженной массы.....	179
Глава 3. Эффективные зарубежные и отечественные биогазовые установки.....	187
3.1 Установка с двухступенчатой системой сбраживания фирмы «Швартинг».....	187
3.2 Установка комплексной переработки навоза фирмы Конструмекс.....	190
3.3 Биогазовая установка фирмы BVT	192
3.4 Установка с секционированным горизонтальным метантенком.....	193
3.5. Установка КОБОС – 1.....	195
3.6 Установка Биогаз 301С.....	196
3.7 Установка Биогаз 5-61С.....	200
3.8 Международные проекты биогазовых установок в Украине.....	202
Глава 4. Конструкционные материалы для оборудования установок метанового сбраживания.....	206
4.1 Коррозия стальных и железобетонных конструкций.....	207
4.1.1 Электрохимическая коррозия металлов.....	208
4.1.2 Биохимическая коррозия металлов.....	211
4.1.3 Коррозия бетона и арматуры.....	215
4.2 Коррозионные исследования и рекомендации по выбору конструкционных материалов оборудования биогазовых установок.....	217
4.2.1 Методика проведения коррозионных исследований.....	217
4.2.2 Результаты промышленных коррозионных испытаний.....	219
4.3 Методы повышения коррозионной стойкости углеродистых сталей.....	223
4.3.1 Металлизация.....	223
4.3.2 Неметаллические покрытия.....	225
4.3.3 Лакокрасочные покрытия.....	229
4.4 Методы повышения стойкости бетонных сооружений	232
4.5 Методы защиты от разрушения метантенков индивидуальных хозяйств.....	234
Глава 5. Экономическая эффективность метанового сбраживания органических отходов.....	238
5.1 Энергетическая составляющая экономического эффекта.....	242
5.2 Агрохимическая составляющая экономического эффекта.....	244
5.3 Экологическая составляющая экономического эффекта.....	247
Заключение.....	254
Список литературы.....	255

Наукове видання

СЕМЕНЕНКО Іван Васильович
ЗІНЧЕНКО Марія Георгіївна

ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОЦЕСИ МЕТАНОВОГО ЗБРОДЖУВАННЯ
ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

Монографія

Роботу до видання рекомендував проф. Тошинський В.І.

Редактор М.П. Ефремова

План 2011 р., поз. 133/

Підп. до друку __.__.12. Формат 60×84 1/16.

Папір друк. № 2. Друк – ризографія. Гарнітура Times.

Ум. друк. арк. . Наклад 300 прим. Зам. № __. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.09.2009 р.

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21